



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

REAKTIIVVÕIMSUSE KOMPENSEERIMINE  
KONDENSAATORPATAREIDEGA ELEKTRILEVI OÜ  
NÄITEL JA TASUVUSE ANALÜÜS

REACTIVE POWER COMPENSATION WITH CAPACITOR BANKS ON THE  
EXAMPLE OF ELEKTRILEVI OÜ AND ANALYSIS OF PROFITABILITY

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Andero Kuriks

Üliõpilaskood: 164080AAVB

Juhendaja: vanemlektor Paul Taklaja

Tallinn, 2019

## AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” ..... 201.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 201.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

# LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Andero Kuriks

*Lõputöö liik:* Bakalaureusetöö

*Töö pealkiri:* Reaktiivvõimsuse kompenseerimine kondensaatorpatareidega Elektrilevi OÜ näitel ja tasuvuse analüüs

*Kuupäev:* 24.05.2019

52 lk

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendaja(d):* Paul Taklaja

*Töö konsultant (konsultandid):* Maanus Roosmann

*Sisu kirjeldus:*

Lõputöö eesmärk oli analüüsida reaktiivvõimsuse kompenseerimise majandusliku tasuvust kondensaatorpatareidega Elektrilevi OÜ näitel.

Töö annab ülevaate reaktiivvõimsuse olemusest, kondensaatorpatareidest ja kuidas kondensaatorpatareidega reaktiivvõimsust kompenseeritakse. Lisaks antakse ülevaade kondensaatorpatareide paigaldamisest jaotusvõrgus, milliste asjaoludega tuleb arvestada ja mis asjaolud mõjutavad kondensaatorpatarei talitlust. Teostatakse tasuvuse analüüs, mis põhineb Elektrilevi OÜ andmetel ja arvestades Elering AS poolt avalikus konsultatsioonis välja pakutud järgmise perioodi võrgutasu struktuuri meetodikat.

Selgub, et Elektrilevi OÜ-l ei tasu reaktiivvõimsust kompenseerida kondensaatorpatareidega Elering AS-i avalikus konsultatsioonis välja pakutud järgmise perioodi võrgutasu struktuuri põhjal, sest tasuvusaeg ületab kondensaatorpatareide talitlusea.

*Märksõnad:* reaktiivvõimsus, kompenseerimine, tasuvus, kondensaatorpatarei, jaotusvõrgud

## ABSTRACT

*Author:* Andero Kuriks

*Type of the work:* Bachelor Thesis

*Title:* Reactive power compensation with capacitor banks on the example of Elektrilevi OÜ and analysis of profitability

*Date:* 24.05.2019

52 pages

*University:* Tallinn University of Technology

*School:* School of Engineering

*Department:* Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

*Supervisor(s) of the thesis:* Paul Taklaja

*Consultant(s):* Maanus Roosmann

*Abstract:*

The aim of this thesis is to analyse profitability of reactive power compensation with capacitor banks on the example of Elektrilevi OÜ.

The thesis gives an overview of reactive power, capacitor banks and how to compensate reactive power with capacitor banks. Additionally thesis gives an overview about capacitor bank instalment in distribution systems, what must be taken into account and what affects capacitor bank functionality. Analysis of profitability is made based on the data of Elektrilevi OÜ and Elering AS public consultation about network service charges structure method for the next period is taken into consideration.

It turns out that it is not profitable to compensate reactive power with capacitor banks in Elektrilevi OÜ based on the structure of the fees for the next period proposed in the public consultation in Elering AS, because the payback period exceeds the life of the capacitor bank.

*Keywords:* reactive power, compensation, profitability, capacitor bank, distribution system

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	<b>Reaktiivvõimsuse kompenseerimine kondensaatorpatareidega Eletrilevi OÜ näitel ja tasuvuse analüüs.</b>
Lõputöö teema inglise keeles:	<b>Reactive power compensation with capacitor banks on the example of Elektrilevi OÜ and analysis of profitability</b>
Üliõpilane:	<b>Andero Kuriks, 164080</b>
Eriala:	<b>Elektroenergeetika</b>
Lõputöö liik:	<b>bakalaureusetöö</b>
Lõputöö juhendaja:	<b>Paul Taklaja</b>
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	<b>Üks aasta</b>
Lõputöö esitamise tähtaeg:	<b>24.05.2019</b>

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppekava juht (allkiri)

## 1. Teema põhjendus

Reaktiivvõimsuse kompenseerimine elektrisüsteemis suurendab üldjuhul selle talitluskindlust, vähendab kaovõimsust ning suurendab võrgu läbilaskevõimet. Reaktiivvõimsuse kompenseerimise teema on aktuaalne jaotusvõrguettevõtetele Elektrilevi OÜ, sest majanduslikult on kasulik võrgukadusid võimalikult minimaalsel tasemel hoida. Antud töö annab Elektrilevile ülevaate, kas ja mis mahus oleks reaktiivvõimsust majanduslikult mõttekas kompenseerida kondensaatorpatareidega. Teema on aktuaalne, sest Elering on esitanud ülekande võrgutasu struktuuri muutmise avaliku konsultatsiooni, kus plaanitakse muuta reaktiivvõimsuse tasu kolm korda soodsamaks aastaks 2021.

## 2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on analüüsida, kas Elektrilevil tasub kompenseerida reaktiivvõimsust kondensaatorpatareidega.

## 3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

1) Kas ja/või mis mahus plaanitava 2021. aasta reaktiivenergia uue hinna tõttu tasuks reaktiivvõimsust Elektrilevil kompenseerida?

- 2) Kui suure reaktiivvõimsuse osakaaluga tasub reaktiivvõimsust kompenseerida?
- 3) Millised oleksid erinevate kondensaatorpatareide paigaldamise ligikaudsed kulud?
- 4) Kuhu on mõistlik kondensaatorpatareisid paigaldada?

#### **4. Lähteandmed**

Eleringi ülekandevõrgu võrgutasu hetkel ja tulevikus.

Elektrilevi poolt tellitud kondensaatorpatareide hinnad.

Kondensaatorpatareide paigaldamise nõuded ja standardid.

Elektrilevi kogemus kondensaatorpatareidega ja selle põhjal talitlusea hinnang seadmetele.

#### **5. Uurimismeetodid**

Töö tulemusteni jõutakse uurides kondensaatorpatareide olemust, omadusi ning paigaldusnõudeid. See põhineb vaatlusel, küsitlustel, kirjanduse analüüsil. Töö lahenduseni jõutakse Exceli tabelarvutusi kasutades.

#### **6. Graafiline osa**

Graafiline osa on peamiselt töö põhiosas. Joonised tulevad kondensaatorpatareidest, nende ehitusest ja jaotusvõrgu skeemidest. Tabelid on tasuvuse arvutusest.

#### **7. Töö struktuur**

##### **1. Kondensaatorpatareid ja reaktiivvõimsus**

- 1.1. Reaktiivvõimsuse olemus ja kompenseerimise vajalikus
- 1.2. Kondensaatorpatarei tööpõhimõtte ja ehitus
- 1.3. Elektrilevis kasutatavad kondensaatorpatareid

##### **2. Kondensaatorpatarei paigaldamise nõuded**

- 2.1. Kondensaatorpatareid jaotusvõrgus
- 2.2. Paigaldamise nõuded ja kondensaatorpatareide valik
- 2.3. Harmoonikud ja filtrid

##### **3. Tasuvuse analüüs**

- 3.1. Reaktiivvõimsuse osakaal võrgus
- 3.2. Reaktiivvõimsuse võrgutasu hind praegu ja tulevikus
- 3.3. Kondensaatorpatarei talitlusea hinnang
- 3.4. Kompenseerimise tasuvuse analüüs hetke võrgutasu ja tuleviku võrgutasu põhjal

## **8. Kasutatud kirjanduse allikad**

Töös kasutatakse raamatuid, teadusartikleid, aruandeid, standardeid.

- 1) "Reaktiivvõimsuse kompenseerimine Eesti elektrisüsteemis" Elering, Tallinn 2017
- 2) EVS-EN 61921:2003 Jõukondensaatorid. Madalpingelised võimsusteguri parandamise kondensaatorpatareid"
- 3) "Kondensaatorseadmete kasutamine võimsusteguri tõstmiseks ja nende võimsuse automaatne reguleerimine", V.Egorov ja E.Saareoks, Tallinn 1959
- 4) "Jaotusvõrgud" Mati Meldorf, Heiki Tammoja, Ülo Treufeldt, Jako Kilter, Tallinn 2007

## **9. Lõputöö konsultandid**

Maanus Roosmann – juhtivspetsialist, Elektrilevi OÜ, kogemus kondensaatorpatareidega

## **10. Töö etapid ja ajakava**

11.03- 11.04 Kirjanduse läbitöötamine, lähteandmete kogumine, teoreetilise osa kirjutamine, arvutuste teostamine

1.04-1.05 Uuringu tulemuste kirjeldamine, järelduste kirjutamine, kokkuvõtte koostamine

1.05 Töö esimene versioon valmis, juhendajale läbilugemiseks saatmine, paranduste sisseviimine

20.05 Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine

22.05 Töö lõplik versioon valmis

# SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE.....	3
ABSTRACT.....	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE .....	5
EESSÕNA.....	10
SISSEJUHATUS .....	11
1. KONDENSAATORPATAREID JA REAKTIIVVÕIMSUS.....	13
1.1 Reaktiivvõimsuse olemus.....	13
1.2 Kondensaatorpatareid ja nende ehitus .....	16
1.2.1 Kondensaatorploki elemendid .....	16
1.2.2 Tühjendustakistid .....	17
1.2.3 Kondensaatorploki läbiviikisolaatorid ja sisemine isolatsioon.....	17
1.2.4 Kondensaatorpatarei kaitsmisviisid .....	18
1.2.5 Kondensaatorpatarei ühendamine ahelaga.....	19
1.2.6 Kondensaatorpatarei reguleerimine .....	21
1.3 Reaktiivvõimsuse kompenseerimine kondensaatorpatareidega.....	22
2. KONDENSAATORPATAREI PAIGALDAMINE JAOTUSVÕRGUS.....	26
2.1 Paigaldamise nõuded ja kondensaatorpatareide valik.....	26
2.1.1 Kondensaatorpatarei nimipinge.....	27
2.1.2 Talitus temperatuur .....	27
2.1.3 Spetsiaalsed tingimused.....	27
2.1.4 Liigpinged .....	28
2.1.5 Liigvoolud .....	28
2.1.6 Kaitse- ja lülitusseadmed .....	28
2.1.7 Reaalne lahendus jaotusvõrgus .....	28
2.2. Harmoonikud ja resonants .....	30
3. TASUVUSE ANALÜÜS.....	34
3.1 Reaktiivvõimsuse võrgutasu hind hetkel ja järgmisel perioodil.....	34
3.2 Reaktiivvõimsuse osakaal võrgus.....	36
3.3 Kondensaatorpatarei paigaldamise hinna kujunemine ja talitlusiga.....	37
3.3.1 Kondensaatorpatarei talitlusiga .....	37
3.3.2 Kondensaatorpatarei paigaldamise hind .....	37



3.4 Reaktiivvõimsuse kompenseerimise tasuvuse analüüs .....	39
3.4.1 Hetke hinnakiri .....	39
3.4.2 Elering AS ülekandeteenuse järgmise perioodi näitlik hinnakiri.....	40
KOKKUVÕTE .....	44
SUMMARY .....	46
KASUTATUD KIRJANDUS .....	48
LISAD .....	50
Lisa 1 Harmoonikute mõõtetulemused [14].....	50
Lisa 2 Tarbimiskoha näide [26] .....	51
Lisa 3 Alajaama 1 mõõtmised programmist Vtrin [14] .....	52

## EESSÕNA

Lõputöö teema idee tekkis Elering AS korraldatud avalikust konsultatsioonist, kus pakuti välja uued näitlikud võrgutasu tariifid aastaks 2021. Võrreldes tänase hinnaga väheneb konsultatsioonis välja pakutud uus näitlik reaktiivenergia tasu ligi kolm korda ja lähtuvalt sellest tekkis autoril huvi, kas ettevõttel Elektrilevi OÜ tasub reaktiivenergiat kompenseerida kondensaatorpatareidega uue tariifisüsteemi järgi. Töö kirjutamisele aitas kaasa ka isiklik kogemus kondensaatorpatareidega ja reaktiivvõimsuse kompenseerimisega. Autor soovib tänada juhendajat Paul Taklajat, kes aitas lõputöös tekkinud probleemide ja küsimuste lahendamise ja lõputöö lõpliku teema püstituse eest soovib autor tänada Elektrilevi OÜ juhtivspetsialist Maanus Roosmanni, kes ühtlasi aitas lõputöö teemal infot koguda ja jagas kogemusi, andmeid Elektrilevi OÜ näitel.

*Pauli soovitusel kirja panen,*

*lühikese jutu luuletan.*

*Reaktiivvõimsus, see mängib vimkat,*

*tihti norib toiteallikat.*

*Kuid kõrini on toiteallikal temast,*

*saaks vaid lahti sellest hädast.*

*Minema reaktiiv vaid hetkeks läeb,*

*kuid tagasi sa pea teda näed,*

*kasu temast ainult vähe.*

*Appi tuleb neile sõber hea,*

*Kondensaator nimeks, sa tea!*

*Kohe toiteallika ta reaktiivist vabastab,*

*ja reaktiivi jälkumist abistab.*

*Lõpuks kõigil rõõmus meel,*

*sest reaktiiv on ainult nende teel,*

*kellel pole kõrini veel.*

Andero Kuriks

andero.kuriks@eesti.ee

59014760

## SISSEJUHATUS

Tänane energiasüsteem on kiires muutuses. Hajatootmise ja salvestustehnoloogiate kiire arengu tõttu muutuvad ülekandevõrgud aina rohkem varustuskindluse tagajaks, mitte ainult energia kandjateks. Selle ajendil on Elering AS on korraldanud avaliku konsultatsiooni ülekandeteenuste võrgutasu järgmise perioodi struktuuri meetoodika kohta, kus lisatakse ülekandetasule võimsuskomponent, mis indikeeriks paremini võrgu varustuskindluse tagamise kulusid ning mis väldiks ebamõistlikult suurte võimsuste ülevalhoidmist, kus see ei ole mõistlik. Lisaks muutub reaktiivenergia tasu ligi kolm korda soodsamaks võrreldes praeguse võrgutasu hinnakirja reaktiivenergia tasuga.

Töö autor puutub kokku tööalaselt kondensaatorpatareide talitluse analüüsi ja reaktiivvõimsuse kompenseerimise küsimustega ning autoril tekkis huvi, kas avalikus konsultatsioonis välja pakutud uue näitliku võrgutasu hinnakirja järgi tasub majanduslikult Elektrilevi OÜ-l reaktiivvõimsust kompenseerida kondensaatorpatareidega, arvestades ka reaktiivvõimsuse mõju avalikus konsultatsioonis välja pakutud võimsuskomponendile. Antud hinnakirja järgi väheneb reaktiivenergiatasu ligi kolm korda. Töö eesmärk on teha tasuvuse analüüs, lähtudes välja pakutud uuest reaktiivenergia tasust, kondensaatorpatarei paigaldamise hinnast, eeldatavast talitluseast ja reaktiivvõimsuse osakaalust elektrivõrgus.

Lõputöö esimene peatükk annab ülevaate reaktiivvõimsusest, kondensaatorpatareidest ning kompenseerimisest, kirjeldab reaktiivvõimsuse olemusest, mis on reaktiivvõimsus, kuidas reaktiivvõimsus tekib ning miks on otstarbekas reaktiivvõimsust kompenseerida. Teine alapeatükk käsitleb kondensaatorpatareide ehitust ja viimases alapeatükis käsitletakse kuidas reaktiivvõimsust kondensaatorpatareidega kompenseeritakse ning mis võimalused selleks esinevad.

Lõputöö teine peatükk annab ülevaate kondensaatorpatareide hinna kujunemisest ning milliste asjaoludega tuleb arvestada kondensaatorpatarei paigaldamise kavandamisel. Esimeses alapeatükis on kirjeldatud nähtusi, mis mõjutavad kondensaatorpatarei talitlust. Teises alapeatükis on kirjeldatud eraldi harmoonikuid võrgus ja nende mõju kondensaatorpatareidele, sest harmoonikud mõjutavad oluliselt hinna kujunemist ning kahjustavad kondensaatorpatareid. Lisaks on kirjeldatud, kuidas kaitsta kondensaatorpatareid harmoonikute olemasolul elektrivõrgus.

Lõputöö kolmandas peatükis analüüsitakse kondensaatorpatareidega reaktiivvõimsuse kompenseerimise tasuvust võrguettevõttes Elektrilevi OÜ arvestades reaktiivenergia võrgutasu hinna muutuse plaani. Esimeses alapeatükis antakse ülevaade hetke võrgutasude hinnast ning Elering AS korraldatud avalikus konsultatsioonis välja pakutud ülekandeteenuse järgmise perioodi näitlikust hinnakirjast ja võrgutasude struktuuri muutmisest. Teises alapeatükis antakse ülevaade

reaktiivenergia osakaalust jaotusvõrgus perioodil 2006 kuni 2018 aasta ja tuuakse välja alajaamad, kus reaktiivenergia tarbimine oli suurim aastal 2018. Kolmandas alapeatükis käsitletakse kondensaatorpatarei paigaldamise hinna kujunemist ning seadme talitlusea hinnangut. Neljandas alapeatükis analüüsitakse reaktiivvõimsuse kompenseerimise tasuvust kondensaatorpatareidega hetke võrgutasu alusel ja avalikus konsultatsioonis välja pakutud näitliku järgmise perioodi ülekandeteenuste hinnakirja alusel, tuginedes eelnevates peatükkides ja alapeatükkides käsitletud andmetele.

# 1. KONDENSAATORPATAREID JA REAKTIIVVÖIMSUS

## 1.1 Reaktiivvõimsuse olemus

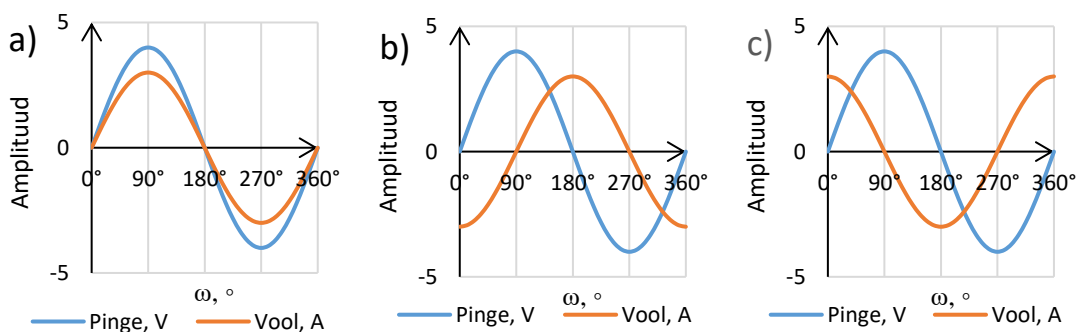
Tänapäeval on kasutusel kaks peamist elektrivoolu liiki, milleks on alalisvool ja vahelduvvool. Elektri ahelas kulgeb alalisvool ja -pinge ühes suunas, aga vahelduvvool ja -pinge on siinuselise laine kujuga, teisisõnu voolu ja pinge suund muutub perioodiliselt. Vahelduvvooluahelas muutub ka võimsuse suund perioodiliselt nagu on kujutatud joonisel 1.2. [1] Alalisvoolu korral on võimsus  $P$ , ühikuga  $W$ -vatt, arvutatav valemiga 1.1, sest ahelas puuduvad pöörlevad elemendid. [2]

$$P = U \cdot I \quad (1.1)$$

kus  $U$  – pinge efektiivväärtus, V-volt

$I$  – voolu efektiivväärtus, A-amper

See valem kehtib ka vahelduvvoolu ahelas, kui ahel on ainult aktiivse iseloomuga. Kui ahelas esineb reaktiivtakistusi, esineb ahelas lisaks reaktiivvõimsust, mille arvutamisel tuleb arvestada faaside erinevustega pinge ja voolu vahel. Võimsuste selgitamiseks on tarvis lahti selgitada pinge ja voolu muutused vahelduvvoolu ahelas, ehk faaside muutused pinge ja voolude vahel olenevalt takistusest. Vahelduvvooluahelas on jagatud takistused aktiivtakistusteks ja reaktiivtakistusteks. Aktiivtakistus tarbib elektrienergiat muundades kogu elektrienergia teiseks energialiigiks nagu näiteks soojuseks. Paljud seadmed nagu trafod, muundurid, asünkroonmootorid, sünkroonmasinad vajavad reaktiivvõimsust elektromagnetvälja tekitamiseks. Reaktiivtakistid on induktiivtakistus(induktiivpoolid) ja mahtuvustakistus(kondensaator). Pinge ja vool jäävad samasse faasi, kui vahelduvpingele on lülitatud aktiivtakisti (Joonis 1.1a). Induktiivtakistis indutseeritakse vahelduvvoolu elektromotoorjõuks, mis tasakaalustab pinget. Vool jääb pingest maha 90 kraadi võrra induktiivtakisti korral (Joonis 1.1b). Kondensaatoris, ehk mahtuvustakistuses on vool võrdeline laengu muutmise kiirusega ning vool on 90 kraadi võrra ees pingest (Joonis 1.1c). [1]



Joonis 1.1 a) Puhtaktiivkoormusega ahel, b) Induktiivse koormusega ahel, c) Mahtuvusliku koormusega ahel

Aktiivvõimsus ehk kasulik võimsus, teisisõnu ka tarbitav võimsus näitab, kui palju elektrienergiat antakse toiteallikalt tarbijale. Puhtaktiivse koormusega ahelas, kus pinge ja vool on samas faasis, ei suundu allikasse võimsust tagasi, vaid tarbitakse ära. Aktiivvõimsust mõõdetakse vattides  $W$ , mis iseloomustab tehtud töö hulka ühes sekundis. Aktiivvõimsus on joonisel 1.2 positiivsel amplituudi poolel, ehk ei tagastata võimsust tagasi allikale. Aktiivvõimsus  $P$  on arvutatav valemiga 1.2. [1] [2]

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (1.2)$$

kus  $U$  – pinge efektiivväärtus, V-volt

$I$  – voolu efektiivväärtus, A-amper

$\cos \varphi$  - võimsustegur

Võimsustegur  $\cos \varphi$  on arvutatav valemiga 1.3. Antud teguriga saab määrata aktiivvõimsuse osakaalu näivvõimsusest ahelas. [1]

$$\cos \varphi = \frac{r}{z} \quad (1.3)$$

kus  $r$  – aktiivtakistus,  $\Omega$

$z$  – näivtakistus,  $\Omega$

Reaktiivtakistus esineb faaside erinevuste tõttu pinge ja voolu vahel. Reaktiivtakisti ja toiteallika vahel toimub katkematu ringlemine, ehk kasuliku tööd ei toimu. Kui kondensaatorile rakendada vahelduvpinge, siis pinge kasvades võetakse toiteallikast võimsust ning salvestatakse see kondensaatori elektrivälja. Vahelduvpinge alanedes kondensaator tühjeneb, ning salvestatud energia suundub toiteallikasse tagasi. Sarnaselt kondensaatoriga, kui vool läbib induktiivtakistust ja elektrivoolu väärtus kasvab, luuakse induktiivsuse ümber magnetväli ning voolu vähenedes liigub magnetväljas salvestunud energia tagasi toiteallikasse. Võib öelda, et induktiivse iseloomuga reaktiivtakisti tarbib ja mahtuvusliku iseloomuga reaktiivtakisti toodab reaktiivvõimsust. Tegelikuses on induktiivse ja mahtuvusliku iseloomuga reaktiivtakistid vastasfaasilised, ehk kompenseerivad üksteist. [2] Reaktiivvõimsust  $Q$ , ühikuga Var - varr, on arvutatav valemiga 1.4. [1]

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (1.4)$$

kus  $U$  – ping efektiivväärtus, V-volt

$I$  – voolu efektiivväärtus, A-amper

$\sin \varphi$  – määrab reaktiivvõimsuse väärtuse

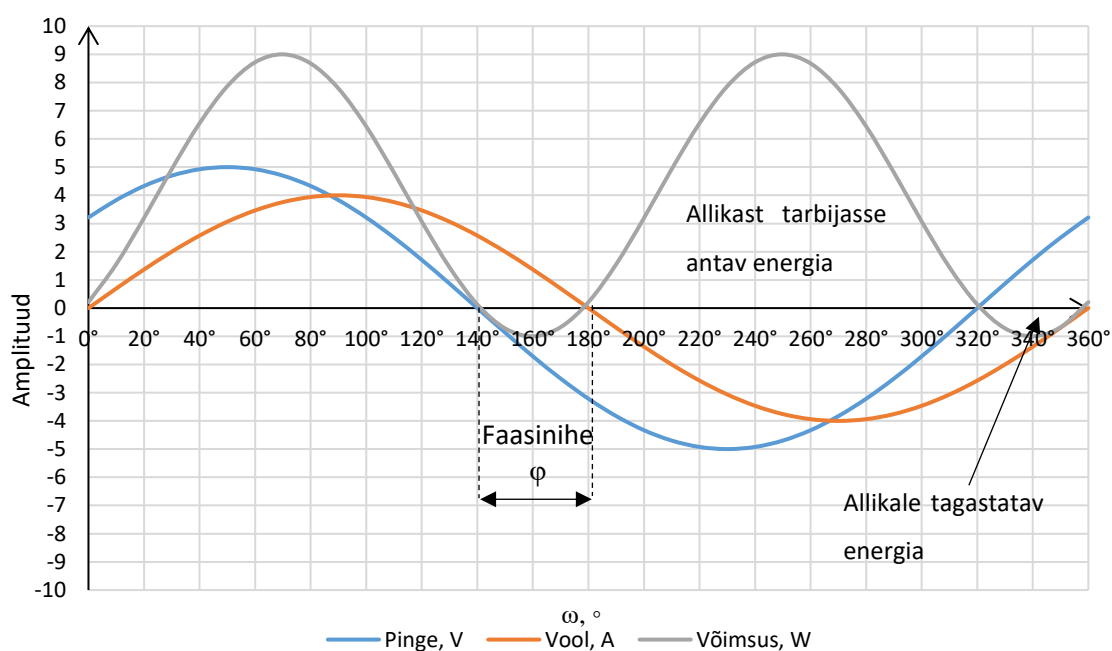
$\sin \varphi$  määrab reaktiivvõimsuse suuruse ahelas ning see on arvutatav valemiga 1.5. [1]

$$\sin \varphi = \frac{x}{z} \quad (1.5)$$

kus  $x$  – reaktiivtakistus,  $\Omega$ -oom

$z$  – näivtakistus,  $\Omega$ -oom

Joonisel 1.2 kujutatud RLC ahela, mis sisaldab nii aktiivtakistust kui ka induktiivset ja mahtuvusliku takistust, põhjal on näha, et võimsus võngub positiivse ja negatiivse väärtuste pooltel ning teatud ajahetkedel on vool ja pinge vastasmärgilised ja hetkvõimsus negatiivne. Negatiivse hetkvõimsuse korral väheneb toiteallikalt tarbijale antava võimsuse osa. Saab järeldada, et mida suurem on faasinihke nurk  $\varphi$ , seda pikem on aeg, millal tagastatakse elektrienergiat toiteallikale. [1]



Joonis 1.2 RLC ahela võimsuse, pinge ja voolu graafik.

Kogu ahelat läbivat võimsust nimetatakse näivvõimsuseks tähisega  $S$ , mille järgi saab valida elektriahelasse seadmeid võimsuse järgi. Näivvõimsuse ühik on VA – volt-amper ja avaldub valemiga 1.6. [1]

$$S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1.6)$$

kus  $U$  – pinge efektiivväärtus, V-volt

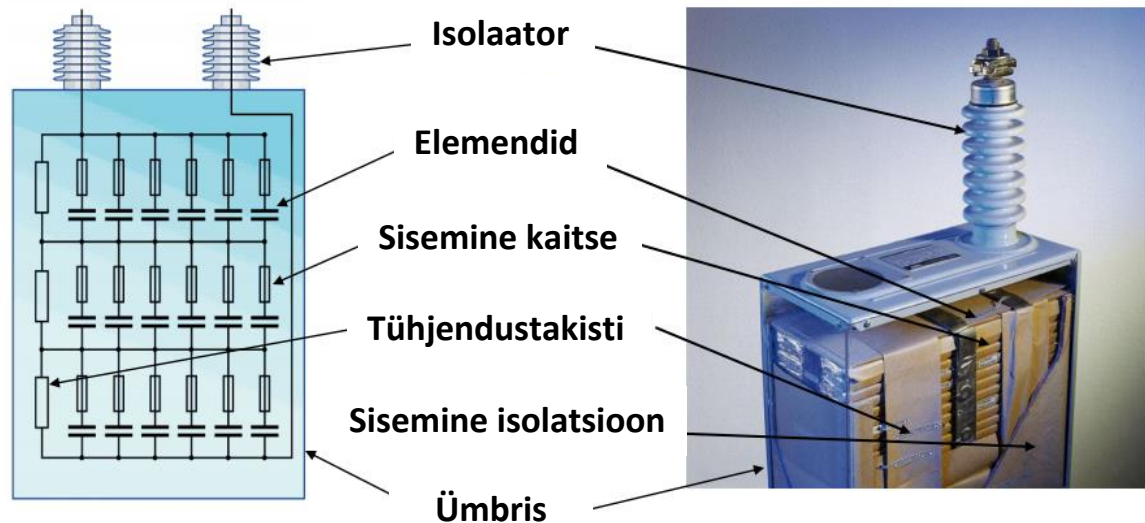
$I$  – voolu efektiivväärtus, A-amper

$P$  – aktiivvõimsus, W-vatt

$Q$  – reaktiivvõimsus, Var-varr

## 1.2 Kondensaatorpatareid ja nende ehitus

Kondensaatorpatarei on seadmete kogum, mis koosneb kondensaatorplokkidest. Lisaks kuuluvad kondensaatorpatarei koosseisu kaitsmed, liigpingepiirikud, lülitid, releed. [3] Jooniselt 1.3 on näha kondensaatorploki ehitus. [4]



Joonis 1.3 Kondensaatorploki ehitus [4]

### 1.2.1 Kondensaatorploki elemendid

Kondensaatorploki elemendid on kondensaatorid. Kondensaatoriks nimetatakse seadet, mis on võimeline elektrilaengut endasse koguma. Kondensaator koosneb kõige lihtsamal juhul kahest juhtivast „plaadist“ ja dielektrikust nende vahel. [5] Sellise kondensaatori mahtuvuse  $C$ , ühikuga F – farad, saab arvutada valemiga 1.7. [4]

$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{h} \quad (1.7)$$

kus  $A$  – juhtiva plaadi pindala,  $m^2$  - ruutmeeter

$h$  – plaatide vaheline kaugus, m - meeter

$\varepsilon$  – dielektriline konstant

Kondensaatorplokis kasutatakse mitmeplaadilisi kondensaatoreid mahtuvuse tõstmiseks, mis on jooniselt 1.3 näha (elemendid). Mitmeplaadilise kondensaatori mahtuvuse  $C$ , ühik F – farad, saab arvutada valemiga 1.8. [6]



$$C = (n - 1) \cdot \frac{\varepsilon \cdot S}{d} \quad (1.8)$$

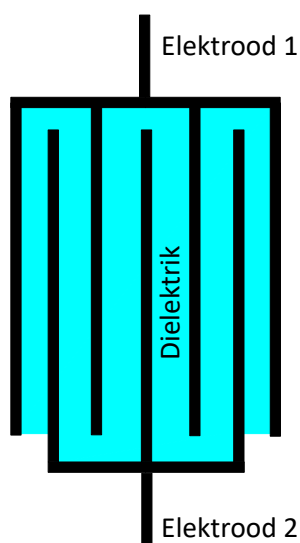
kus  $n$  – plaatide arv, tk - tükk

$S$  – kohakutiolevate elektrootide pind, m<sup>2</sup> - ruutmeeter

$d$  – elektrootidevaheline kaugus, m - meeter

$\varepsilon$  – dielektriline konstant

Mitmeplaadilise kondensaatori ehitus on joonisel 1.4.



Joonis 1.4 Mitmeplaadilise kondensaatori ehitus

### 1.2.2 Tühjendustakistid

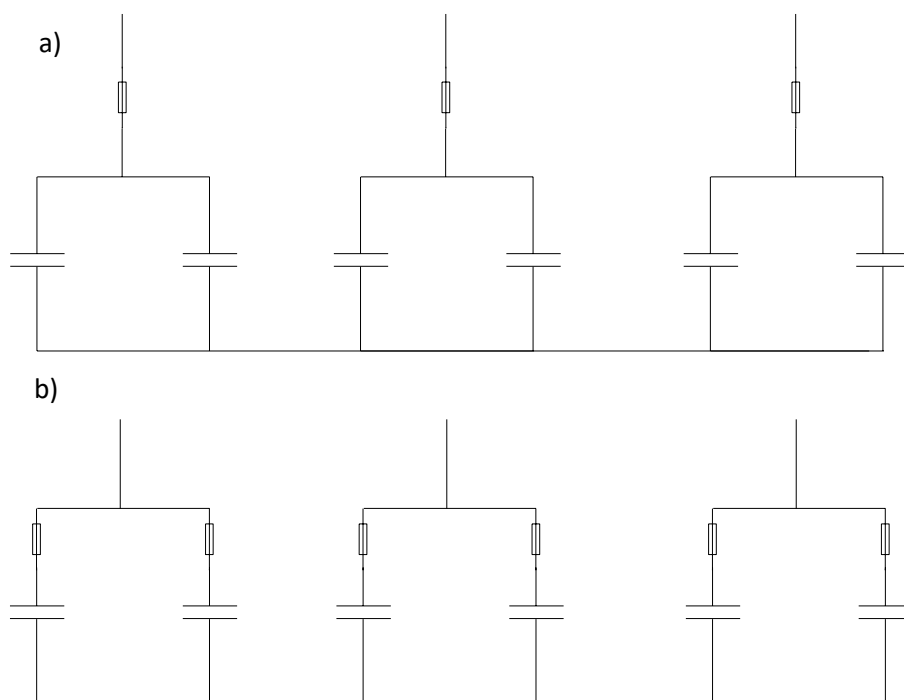
Tühjendustakistid tagavad ohutu elektrilaengust tühjaks laadimise kondensaatorploki pärast seda, kui kondensaatorploki toide on katkestatud. See väldib ohtlike olukordi kondensaatorpatarei hooldusel või teisi seadmeid ahelasse ühendades. Tühjendustakistite eesmärk on ühtlasi ka balansseerida pinget kondensaatorploki jadamisi ühendatud kondensaatoritel. See tagab et, üksikul kondensaatoril ei tõuseks pinge üle ettenähtud maksimaalse väärtuse. [7]

### 1.2.3 Kondensaatorploki läbiviikisolaatorid ja sisemine isolatsioon

Kondensaatorploki läbiviikisolaatorid peavad tagama ohutu ühenduse kondensaatorploki ja välise pingestatud elektrijuhi vahel. Kondensaatorplokkidel, mis on sisemise õliisolatsiooniga, ei tohi isolaatorid lasta õlil välja lekkida seadmest. Lisaks peavad isolaatorid vastu pidama muutuvatele keskkonnatingimustele nagu temperatuur, mehaanilistele jõududele, pingetele ja vooludele ilma koroonat tekkimiseta, ülelöökidele ja ülekuumenemisele. Sisemine isolatsioon peab tagama kondensaatorploki elementide galvaanilise eraldatuse kestast. [8]

## 1.2.4 Kondensaatorpatarei kaitsmisviisid

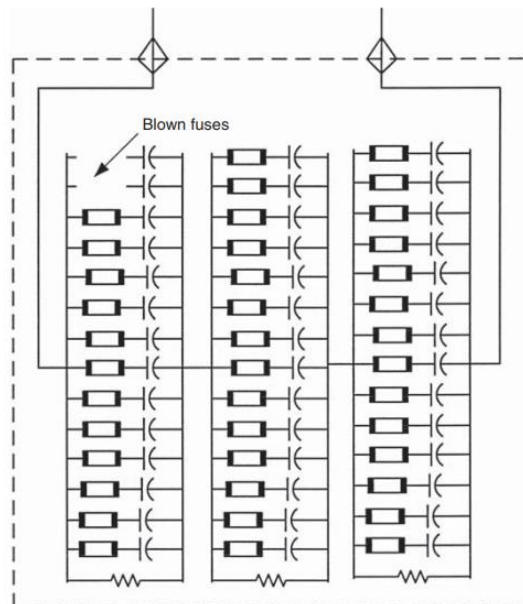
Kondensaatorpatarei võib olla sisemiste kaitsmetega, väliste kaitsmetega või ilma kaitsmeteta. Kaitsmed peavad olema voolu limiteerivad, arvestades koormus- või lühisvoolu kondensaatorpatarei paigalduskohas. Enamasti kasutatakse sulavkaitsmeid. Väliste kaitsega kondensaatorpatarei kaitsmisviisid jagunevad grupiliseks ja individuaalseks kaitsmiseks. Grupilisel kaitsmisviisil on mitu kondensaatorpatarei kondensaatorplokki kaitstud ühe kaitsmega. Sellist kaitsmisviisi kasutatakse peamiselt madalpingevõrkudes. Kondensaatorpatarei maksimaalne võimsus või elementide arv on piiratud võimaliku kaitsme suurusega. Joonisel 1.5a on näidatud grupiline kaitsmisviis. Individuaalsel kaitsmisviisil saab kasutada väiksemaid kaitsmeid, sest koormusvoolud jagunevad talitluskorras kondensaatorplokkide vahel. Kui kaitse rakendub ühel kondensaatorpatarei elemendil, siis ei pea kogu kondensaatorpatareid välja lülitama, sest ülejäänud kondensaatorplokkide talitus võib jätkuda. Kondensaatorpatarei reaktiivvõimsus väheneb väljalülitatud elementide reaktiivvõimsuste võrra. Antud kaitsmisviis tagab suurema talitluskindluse. Joonisel 1.5b on näidatud kondensaatorpatarei plokkide individuaalne kaitsmisviis. [3]



Joonis 1.5 Grupiline ja individuaalne kondensaatorpatarei väline kaitse

Sisemise kaitsega kondensaatorpatareil on kaitsmed kondensaatorploki sees. Kaitse on ühendatud jadamisi iga kondensaatorploki elemendiga ehk kondensaatoriga (joonis 1.6). Lühise korral kondensaatorploki elemendis kasvab kaitset läbiv vool proportsionaalselt jadamisi oleva elemendiga, see tagab kiire kaitse rakendumise. Üldjuhul on kondensaatorplokkid disainitud

mitmete paralleelsete elementidega ja pinge tõus ülejäänud elementides ei ületa lubatud väärtusi. Joonisel 1.6 on näidatud üksikute elementide paralleelühendusi kui ka elemendiplokkide jadaühendusi. Ühe elemendi lühis põhjustab selle elemendiga paralleelis olevatele elementidele pinge langust ja see omakorda tekitab jadamisi elementidele pingetõusu lühise hetkel. Lühise möödudes jääb aga läbipõlenud elemendiga elemendiplokile kestvalt suurem talitluspinge kui selle elemendiplokiga jadamisi ühendatud, tervete üksikute elementidega, elemendiplokkidele (joonis 1.6). Seda seetõttu, et läbipõlenud elemendi tulemusena suureneb selle elemendiploki reaktiivtakistus. Suurema reaktiivtakistusega elemendiplokile jääb seetõttu ka suurem pingelang kui selle ploki jadamisi ühendatud, tervete elementidega ja väiksema summaarse reaktiivtakistusega elemendiplokkidele. Ühe elemendi kaitse rakendamisel väheneb kondensaatorploki mahtuvus ja reaktiivvõimsus. Joonisel 1.6 on näidatud ka *blown fuse*, ehk antud joonise kahel elemendil on kaitse rakendunud. [3]



Joonis 1.6 Sisemine kaitse [3]

Ilma kaitsmeteta kondensaatorpatarei kaitsmisviis ei tähenda täielikult kaitsmete puudumist. Kui kondensaatorploki element, mis on iseparanevat tüüpi kilekondensaator siis kondensaatori dielektriku läbilöögi tekkimisel dielektrikuna kile sulab ära ja selle tagajärjel tekib nii öelda keevitus kahe elektroodi vahel. See tekitab väikese takistusega lühise, mis ei genereeri palju soojust või gaase, senikaua kuni dielektriku lühisekohta läbiv vool on limiteeritud. [3]

### 1.2.5 Kondensaatorpatarei ühendamine ahelaga

Suurema võimsuse ja talitluspinge jaoks ühendatakse kondensaatorplokkid rööbiti ja jadamisi kondensaatorpatareideks. Kondensaatorpatarei lubatud talitluspinge suurendamiseks

ühendatakse kondensaatorplokid jadamisi ning rööpselt ühendatud kondensaatorplokkide suurendamisega saab tõsta kondensaatoripatarei mahtuvust ning sellega seoses suureneb ka reaktiivvõimsus ja reaktiivvool. [9]



Joonis 1.7 Rápina kondensaatoripatarei

Kolmefaasilise kondensaatoripatarei saab elektrivõrku ühendada kolmnurk, täht või maandatud tähtühendusega. Optimaalne ühendusviis sõltub kas elektrisüsteem on maandatud või mitte, kaitsmisviisidest kondensaatoripatareil ja harmoonikutest. Kondensaatoripatareid ei genereeri harmoonilisi pingeid, kuid kuna kondensaatoripatarei impedants on proportsionaalne sagedusega, siis kondensaatorid tekitavad madala impedantsiga teekonna kõrgete sagedustega vooludele. See võib põhjustada voolu harmoonikute levimist, mida ilma kondensaatoripatareita võrgus sellisel määral ei esineks. [10]

Kolmnurkühendust kasutatakse peamiselt maandamata elektrisüsteemidest ja eeldusel, et lühisvool ei ole väga suur. Kondensaatoripatareid peab valima liinipinge järgi kolmnurkühenduse korral. Lisaks kolmnurkühenduses kondensaatoripatareid ei lase kolmandat järku harmoonikutel võrgus voolata. Kui süsteemis on suured lühisvoolud, siis on otstarbekam kasutada maandamata tähtühendust. Maandamata tähtühenduses kondensaatoripatareisid saab kasutada maandatud ja maandamata elektrisüsteemides. Maandamata elektrisüsteemides, kus on suured lühisvoolud, on parem kasutada maandamata tähtühendust kolmnurkühenduse asemel, sest kondensaatoripatareid saab sulavkaitsmetega lihtsamini kaitsta. Maandamata tähtühenduses peab valima kondensaatoripatarei liinipinge järgi, sest kui üks faas kolmefaasilise kondensaatoripatarei korral lühistub, siis kahel teisel faasil on faasipinge asemel liinipinge. Maandatud tähtühenduses kondensaatoripatareid kasutatakse ainult maandatud elektrisüsteemides, sest maandamata elektrisüsteemis tekitaks see maaühendusvoolu läbi kondensaatorite mahtuvuslike juhtivuste.

Maandatud tähtühenduses kondensaatoreid on lihtsam kaitsta, aga lühisvoolud võivad olla väga suured. Lisaks on probleemiks harmoonikud, sest voolu harmoonikud saavad antud süsteemis voolata. Maandatud neutraali tõttu ei saa kondensaatorplokid sattuda liinipinge alla, järelikult tuleb kondensaatorplokid valida võimaliku liini ja neutraali vahelisele pingele. [10]

Kolmefaasilise kondensaatorpatarei korral olenevalt ühendusviisist, avaldub ühe faasi reaktiivvõimsus valemiga 1.9, ja summaarne reaktiivvõimsus kolme erinevasse faasi lülitatud ühe faasiliste kondensaatorplokide peale kokku valemiga 1.10. [11]

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot U^2 \cdot C \quad (1.9)$$

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 3 \cdot U^2 \cdot C \quad (1.10)$$

kus  $f$  – süsteemi sagedus, Hz - hertz

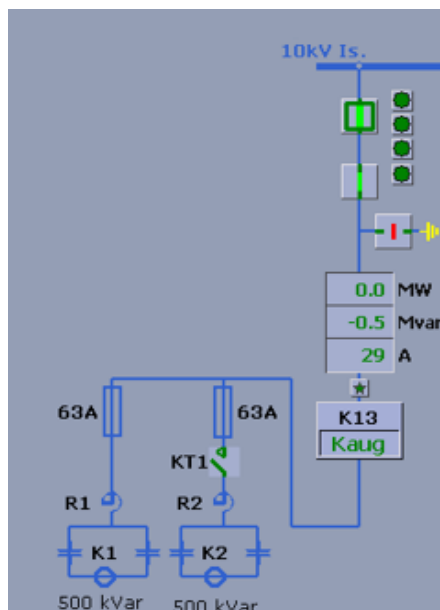
$U$  – faasipinge, V - volt

$C$  – kondensaatorpatarei ühe faasi kogumahtuvus, F - farad

### 1.2.6 Kondensaatorpatarei reguleerimine

Kondensaatorpatarei võimsuse reguleerimine läbi erinevate kondensaatoriteplokide sisse/välja lülitamise on nõutud peamiselt tänu reaktiivkoormuse muutusele alajaamas sõltuvalt ajast. Väikese reaktiivkoormusega perioodil on reaktiivvõimsuse vajadus elektrivõrgus väiksem ning ülekompenseerimise vältimiseks tuleb kondensaatorpatarei võimsust vähendada, selleks lülitatakse kondensaatori aste/astmed välja. Maksimaalse koormuse ajal tuleb kondensaatorpatarei võimsust üldjuhul maksimaalselt kasutada, et kompenseerimine oleks täies mahus, selleks lülitatakse kondensaatori aste/astmed sisse. Kondensaatorpatarei võimsuse reguleerimise lihtsaim viis on üheastmeline reguleerimine, mille juures kogu kondensaatorpatarei tervikuna lülitatakse võrku või võrgust välja. Mitmeastmelise reguleerimise korral on kondensaatorpatarei jagatud üksikuteks sektsioonideks, ning sisse- ja väljalülitamisega muutub kondensaatorpatarei mahtuvus ja ka reaktiivvõimsus. [12] Elektrilevis juhitakse kondensaatorpatareide astmeid automaatselt (vastavalt automaatikaga juhtimisalgoritmile), käsitsi kohapealt või kaughaldusega SCADA-st, mis on jaotusvõrgu juhtimissüsteem. Juhtimiskäske genereeritakse sõltuvalt kondensaatorpatarei väiksema võimsusega astme nimivõimsusest. Kui tarbitav reaktiivvõimsus on absoluutväärtuselt väiksem kui 62,5% väiksema astme nimivõimsusest, siis juhtimist ei toimu. Kui tarbitav reaktiivvõimsus on suurem kui 62,5% väiksema astme nimivõimsusest, siis juhtimine toimub. Joonisel 1.8 on SCADA pilt Räpina kondensaatorpatareist. Antud patarei on kahe astmega. Võimsuslülitiga on võimalik kogu kondensaatorpatarei välja

lülitada. Juhul kui võimsuslüliti on sees, on kondensaatorpatarei võimsus 500 kVar ning kontaktori KT1 sisse lülitamisel on kogu kondensaatorpatarei võimsus 1000 kVar. [13]



Joonis 1.8 Rápina kondensaatorpatarei (SCADA) [14]

### 1.3 Reaktiivvõimsuse kompenseerimine kondensaatorpatareidega

Reaktiivvõimsust vajavad trafod, mootorid, generaatorid ja muud seadmed elektromagnetvälja tekitamiseks. Tänu sellele peab elektrivõrkudes reaktiivvõimsust edasi kandma, kuid see ei ole majanduslikult kasulik ning omakorda suurendab kadusi elektrivõrkudes. Selle tõttu kompenseerivad võrguettevõtted reaktiivvõimsust kondensaatorpatareidega tarbija lähedal või mingis muus kindlas kohas, kus see toob kasu. [15]

Reaktiivvõimsuse kompenseerimise iseloomustamiseks on otstarbekas kasutada võimsustegurit  $\cos \varphi$ . Võimsustegur  $\cos \varphi$  iseloomustab aktiivvõimsuse osakaalu näivvõimsusest. Teisisõnu näitab kui suure osakaaluga elektrienergiat muundatakse teisteks energialiikideks nagu näiteks soojuseks. Võimsustegur avaldub valemiga 1.11. [1]

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (1.11)$$

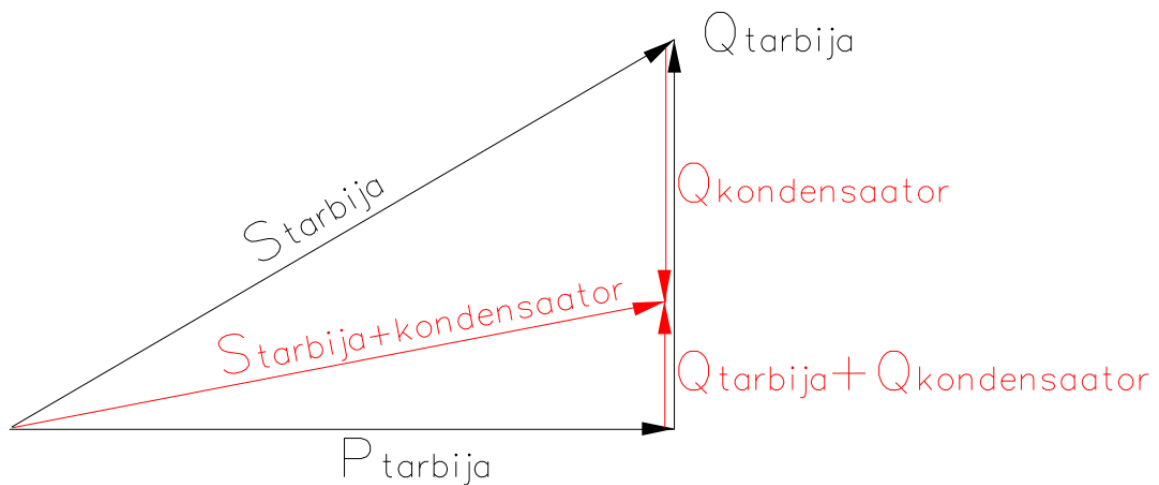
kus  $P$  – aktiivvõimsus, W - vatt

$S$  – näivvõimsus, VA – volt-amper

$Q$  – reaktiivvõimsus, Var - varr

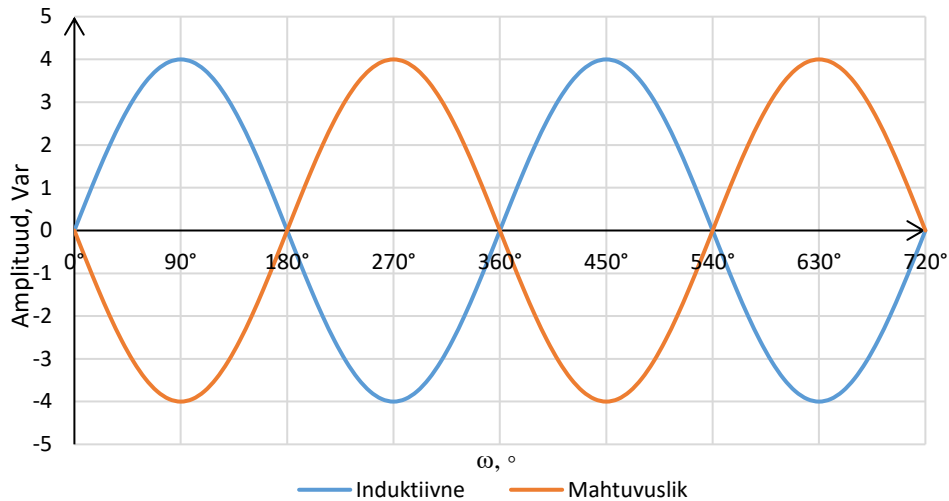
Mida suurem on võimsustegur, seda suurem on aktiivvõimsuse osakaal näivvõimsusest ja seda vähem on reaktiivvõimsust. Võimsustegur võib olla maksimaalselt 1. Võrguettevõtted kompenseerivad reaktiivvõimsust eesmärgiga, et võimsustegur oleks võimalikult arvu ühe lähedane. Võimsustegur võib olla 1 näiteks hõõglambil, sest hõõglambil on ainult aktiivtakistus põhiliselt. Vahelduvvoolumootoritel oleneb võimsustegur koormusest, nimikoormusel on võimsustegur tavaliselt 0,8...0,9, alakoormusel 0,25...0,3. [1]

Kondensaatorpatarei reaktiivvõimsuse kompenseerimise efekt on näha jooniselt 1.9, kus on kujutatud võimsuste kolmnurk. [10]



Joonis 1.9 Võimsuste kolmnurk

Antud juhul on kondensaatorpatarei lülitatud paralleelselt induktiivtakistusega tarbijale. Kui kondensaatorpatarei lülitada ahelasse, siis see vähendab võrgus edastatavat reaktiivvõimsust, sest kondensaatorpatarei tagab tarbija reaktiivvõimsuse vajaduse koha peal. Kondensaatorpatarei on antud olukorras nagu reaktiivenergiageneraator. Voolud on kondensaatoris ja induktiivpoolis omavahel vastassuunalised ja kondensaatorpatarei lülitamine ahelasse vähendab reaktiivvoolu ning faasinihet kondensaatorpatarei ja toiteallika vahel. Võimsused on induktiivpoolil ja kondensaatoril faasilt vastupidised, ning kui kondensaatorpatarei võimsus on võrdne induktiivpooli võimsusega, siis tekib olukord, kus ühel hetkel tarbib pool reaktiivvõimsust ja kondensaator annab reaktiivvõimsust, ning vastupidi, nagu on näidatud joonisel 1.10. [10] [1]

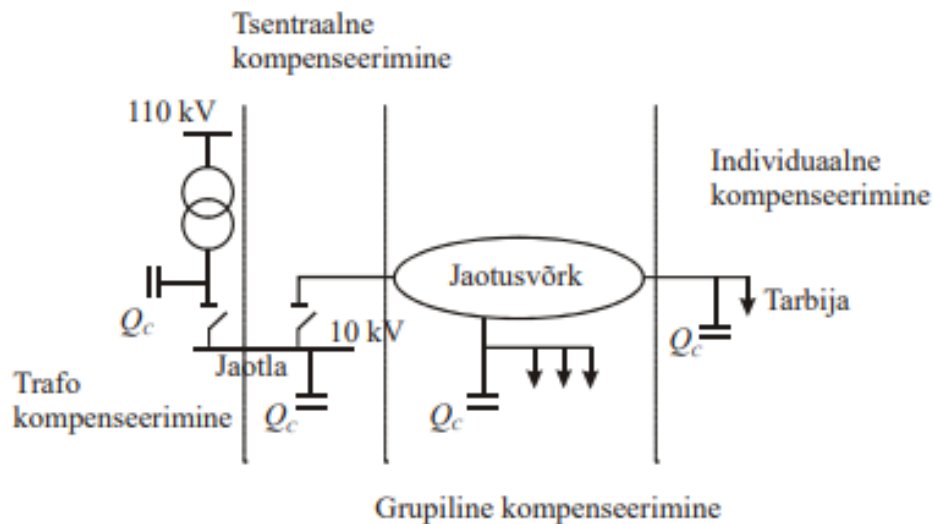


Joonis 1.10 Induktiivse koormuse täielik kompenseerimine mahtuvusliku koormusega.

Kui reaktiivvõimsused on võrdsed, tekib olukord, kus võimsustegur on võrdne arvuga 1, sest vooluallikalt antakse tarbijale ainult aktiivvõimsust, ning tarbija reaktiivvõimsus antakse kondensaatorpatareist. [1]

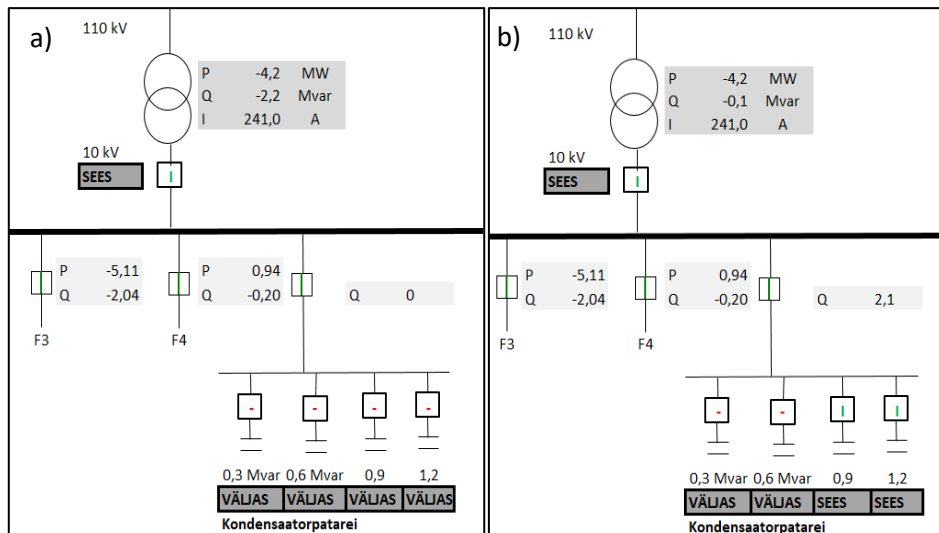
Reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks ühendatakse kondensaatorpatarei kas keskpingevõrku või madalpingevõrku. Juhul kui kondensaatorpatarei on ühendatud keskpingevõrku, esineb tsentraliseeritud kompensatsioon või trafo kompensatsioon. Trafo kompensatsioon ja tsentraalne kompensatsioon kompenseerivad keskpingevõrgu fiidrite kui ka jaotusvõrgu reaktiivkoormuse antud sõlmepunktis ning vastavalt joonisele 1.11 trafo ning 110kV võrk ei pea enam reaktiivvõimsust üle kandma. Antud kompenseerimise viis on kõrge kasutustundide arvuga. Grupiline kompensatsioon kompenseerib jaotusvõrgu reaktiivkoormuse. Individuaalne kompensatsioon kompenseerib ainult ühe tarbija reaktiivvõimsuse vajaduse ning tarbijale reaktiivvõimsust edasi ei pea kandma. Antud kompenseerimise puuduseks on madal kasutustundide arv, kuid samas avaldab ka kõige väiksemat koormust võrgule. Kõikidel kompenseerimise viisidel on kasulik kasutada automaatselt reguleerivat seadet, et ei toimuks suurt üle- ega alakompenseerimist. Joonisel 1.11 on näidatud kompenseerimise viisid. [16] [11]





Joonis 1.11 Kompenseerimise viisid [11]

Elektrilevi OÜ kasutab tsentraalset kompenseerimist keskpinge võrgu alajaama lattidel, et vähendada sisseostetavat reaktiivenergiat. Joonisel 1.12 toodud näide, kuidas kondensaatorpatareidega kompenseeritakse. Joonisel on näidatud alajaam, kus on väljuvad fiidrid F3 ja F4 ning nende reaktiivkoormused 2,04 MVar ja 0,20 MVar. Trafos ülekantava reaktiivvõimsuse moodustavad need kaks fiidrit. Joonisel 1.12a kantakse reaktiivvõimsust 2,2 MVar-i üle jaotusvõrku ning kõik kondensaatorpatarei astmed on välja lülitatud. Võimsuse ees olev miinus märk näitab võimsuse suunda. Trafol miinus märk reaktiivvõimsuse ees tähistab, et võimsus liigub fiidrite poole ning fiidritel miinus märk tähistab tarbimist. [14]



Joonis 1.12 Tsentraalse kompenseerimise näide [14]

Joonisel 1.12b on sisse lülitatud kondensaatorpatarei kondensaatorid astmete suurustega 0,9 MVar ja 1,2 MVar. Sellise kompenseerimise korral peab põhivõrgust jaotusvõrku ainult 0,1 MVar reaktiivenergiat üle kandma, sest 2,2 MVarist kompenseerib kondensaatorpatarei 2,1 MVar reaktiivvõimsust. [14]

## 2. KONDENSAATORPATAREI PAIGALDAMINE JAOTUSVÕRGUS

### 2.1 Paigaldamise nõuded ja kondensaatorpatareide valik

Kondensaatorpatarei paigaldamisel ja kondensaatorpatarei valikul keskpinge võrku peab arvestama mitmete asjaoludega. Elektrilevi seisukohalt peab seade tagama elektrivõrgu funktsionaalsuse, olema pika kasutusajaga, töökindel, optimaalsete omaduste ja hooldusvajadustega ning arvestama keskkonnaga. [17] Tabelis 2.1, 2.2 ja 2.3 toodud nõuded rakendatakse keskpinge kondensaatoritele, mis on Elektrilevi jaotusvõrgus mõeldud reaktiivenergia kompenseerimiseks.

Tabel 2.1 Kliimaolud [17]

Paigaldusviis	Sisepaigaldis
Temperatuuri vahemik	-25...+40
Maksimaalne kõrgus merepinnast	1000m
Keskmine õhuniiskus 48h jooksul	100%

Tabel 2.2 Elektrivõrgu parameetrid [17]

Suurim lubatud kestev pinge	7,2-12-17,5-24 kV
Sagedus	50 Hz
Neutraali maandamisviis	Isoleeritud või resonantsmaandatud
Maaühenduse liigpinge tegur	1,9xUm
Maaühenduse väljalülitamise aeg	8h

Tabel 2.3 Üldnõuded kondensaatorite konstruktsioonile [17]

Tüüp	Ühefaasiline kondensaator kolmefaasilise maast isoleeritud või kompenseeritud elektrivõrgu jaoks. Ühe või mitme astmeline
Konstruktsioon	Kile tüüpi kondensaatorid immutatud keskkonnaohutu kondensaatorvedelikuga hermeetilises metallkorpuses
Paigaldusviis	Vertikaalne
Sulavkaitsmed	Sisemised
Mahalaadimistakisti	Sisemine

Elektrilevi jaotusvõrku paigaldatud kondensaatorpatareid peavad olema projekteeritud ja ehitatud vastavalt standardile EVS-EN 60871-1 ning kondensaatori sisemised sulavkaitsmed standardi EVS-EN 60871-4 järgi. [17]

Võrreldes enamike elektriliste seadmetega, talitlevad kondensaatorpatareid pidevalt täiskoormusel. Kondensaatori talitlusiga lühendab peamiselt liiga kõrged talitusparameetrid, sellepärast tuleb kondensaatorpatarei elektrivoolu, pinget ja temperatuuri kontrollida reaalajas pidevalt. [18]

### **2.1.1 Kondensaatorpatarei nimipinge**

Kondensaatorpatarei nimipinge ei tohi olla alla maksimaalse elektrivõrgu talitluspinge, kuhu kondensaator on ühendatud, arvestades lisaks kondensaatorpatarei enda poolt tekitatud pinge tõusu elektrivõrgu antud sõlmepunktis. Elektrivõrgu nimipinge ja talitluspinge vahel on tihti suured erinevused, ning need erinevused peab kondensaatorpatarei valimisel kindlaks tegema, sest kondensaatorpatarei jõudlus ja talitlusiga sõltub selle toitepingest. Induktiivsete elementide, näiteks reaktorite lisamisel jadamisi kondensaatorpatareidega harmoonikute vähendamiseks või lülitamisel tekkivate liigvoolude piiramiseks, tuleb arvestada pinge tõusuga kondensaatorpatarei klemmidel. Kondensaatorpatarei võib talitleda üle lubatud maksimaalse pinge ainult hädaolukorras lühikest aega. [18]

### **2.1.2 Talitus temperatuur**

Kondensaatorpatarei talitlusel on temperatuur väga tähtis parameeter, sest temperatuur mõjutab kondensaatorpatarei talitlusiga. Kui kondensaatori dielektrik saavutab temperatuuri, mis on üle lubatud temperatuuri, võivad dielektrikus tekkida erinevad osalahendused. Eriti oluline on see lülitamistel, sest kondensaatorpatarei sisse lülitamisel tekivad suured voolud, mis omakorda tekitavad suuremaid kadusi. Kõik kadusi tekitavad seadmed, nagu kaitsmed, reaktorid, peab arvestama sisse kondensaatorpatarei kadude arvutamisel. Kondensaatorpatarei paigaldamisel peab arvestama, et kondensaatorpatarei kadudest tekitatud soojus oleks piisavalt hajutatud keskkonda. Kondensaatorplokkide vahel peab toimuma hea õhu tsirkulatsioon. [18]

### **2.1.3 Spetsiaalsed tingimused**

Kondensaatorpatarei tellija peab spetsiaalsed keskkonna tingimused kindlaks tegema. Nendeks tingimusteks on näiteks: kõrge niiskusesisaldus õhus – antud tingimusel on vaja kasutada isolaatoreid, mis sobivad sellisesse keskkonda; kiire hallituse kasv - metallid, keraamilised materjalid ja kindlad värvid ei talu hallitust. [18]

### **2.1.4 Liigpinged**

Elektrivõrgus, kuhu on kondensaatorpatarei paigaldatud, ei tohi pinge tõusta üle 1,4 kordse pinge efektiivväärtuse. Kondensaatorpatareid lahti ühendades elektrivõrgust võivad tekkida liigpinged. Kondensaatorpatareile peab valima lüliti, mis ei luba elektrikaare taassüttimist lülitades. Kondensaatoritele, millel on äikesest tekkivate liigpingete oht, peab paigaldama liigpingepiirikut võimalikult kondensaatorpatarei lähedale. Kui kondensaatorpatarei pannakse kokku juhuslikest kondensaatorplokkidest, siis tuleb arvesse võtta liigpinged, mis võivad tekkida mahtuvuste erinevuste tõttu plokkide vahel. [18]

### **2.1.5 Liigvoolud**

Liigvoolu võivad tekitada pinge tõusud nimisagedusel või harmoonikud. Peamised harmoonikute tekitajad on alaldid, türistoriga seadmed ja küllastunud trafode mähised. Kui pinge tõuseb kondensaatoripatarei tõttu väikese koormuse juures, siis trafo küllastumine võib olla märkimisväärne. Sellisel juhul tekivad harmoonikud, mis tekitatakse transformaatori ja kondensaatori vahel resonantsi tõttu. Pinge lainekuju ja elektrivõrgu karakteristikud peab enne kondensaatorpatarei paigaldamist kindlaks tegema, et ei tekiks resonantsi ohtu. Transient liigvoolud võivad tekkida kondensaatorpatarei lülitamisel elektrivõrku või kondensaatorpatarei astme suurendamisel. Takistiga lülitades saab antud liigvoole piirata või kasutades reaktoreid. Lülitamisel tekkivad liigvoolud peab piirama alla saja kordse nimivoolu väärtuse. [18]

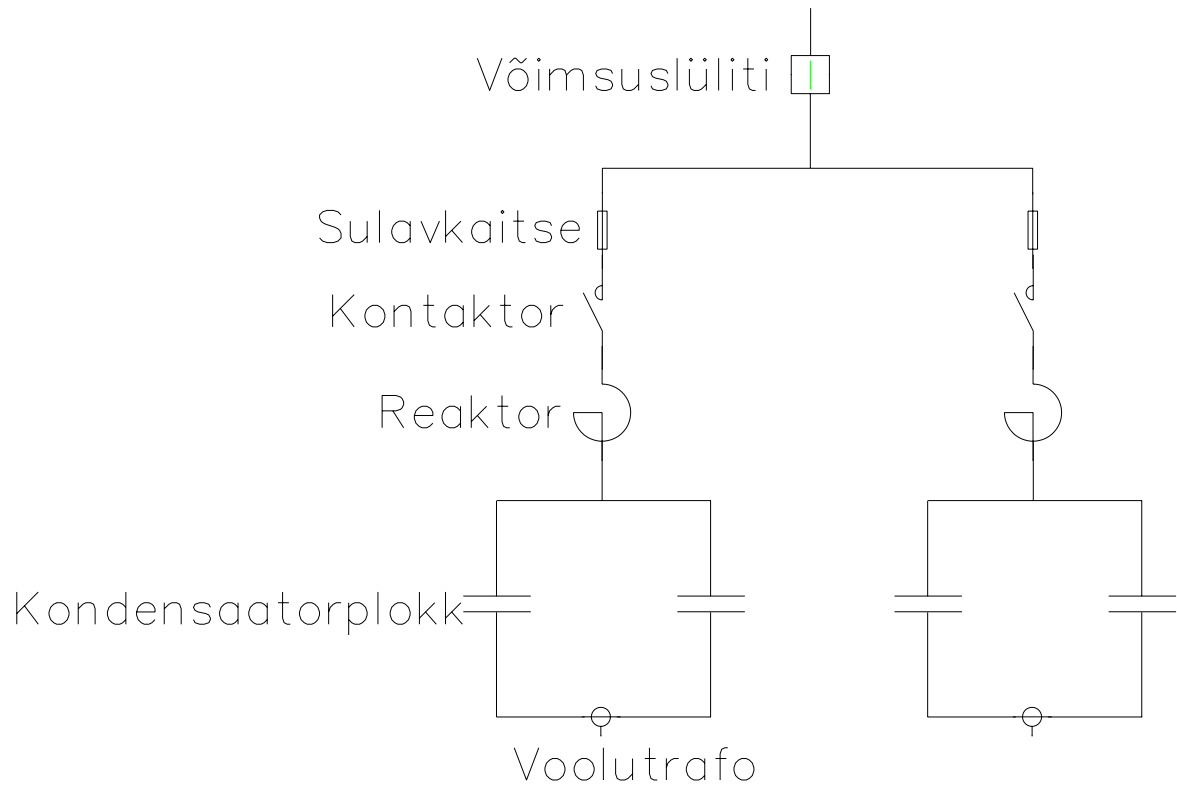
### **2.1.6 Kaitse- ja lülitusseadmed**

Kaitse ja lülitusseadmed peavad taluma 1,3 kordset nimivoolu. Sõltuvalt kondensaatorpatarei reaalsest mahtuvusest, mis võib olla kuni 1,1 kordne nimimahtuvusest, võib vool tõusta 1,43 kordseks nimivoolust individuaalsele kondensaatorplokkile. Seadmed peavad taluma elektrodünaamilisi ja termilisi koormusi, mis tekivad liigvooludest lülitamisel. Kui kondensaatorpatarei on automaatjuhtimisel, võib lülitamisi lühikese aja jooksul toimuda mitmeid ja selle tõttu võivad tekkida suured termilised koormused, siis peab valima kaitsmed, mis taluvad antud tingimusi. Kondensaatorpatareile on soovitatav lisada releekaitstesüsteemid, mis soovimatute olukordade ajal reageerivad kiiresti. [18]

### **2.1.7 Reaalne lahendus jaotusvõrgus**

Joonisel 2.1 toodud näitest on näha, milline on üldjuhul reaalne lahendus jaotusvõrgus kondensaatorpatareil. Antud joonisel on näha kahte kondensaatorpatarei ühendust. Kondensaatorpatarei plokiid on paralleelselt ühendatud koos voolutrafoga. Reaktor on paigaldatud antud lahenduses liigpingete ja voolude piiramiseks, mis tekivad kondensaatorpatarei sisse ja välja

lülitamisel. Lisaks on paigaldatud kaks sulavkaitsset, mis liiga kõrge voolu korral peavad rakenduma. Kontaktorid on kondensaatorpatarei astmete lülitamiseks. Võimsuslülititi on kogu kondensaatorpatarei väljalülitamiseks ja täidab ühtlasi ka kaitse funktsiooni. [14]



Joonis 2.1 Reaalne lahendus jaotusvõrgus

## 2.2. Harmoonikud ja resonants

Harmoonikud on vahelduvpinged ja –voolud sagedusega, mis erinevad võrgusagedusest. Ideaalses olukorras on pinge ja vool siinuselise lainekujuga, kuid realses elektrisüsteemis on pinge ja vool vähem või rohkem siinuslainest erineva kujuga. [19] Kolme faasilistes süsteemides esinevad üldjuhul paaritu arvulised harmoonikud, nagu näiteks 3, 5, 7, 9 järku harmoonikud. Näiteks 5. järku harmooniku sagedus on 50Hz elektrisüsteemis 250Hz. Harmoonikuid tekitavad mitte-lineaarsed koormused. Koormus on mitte-lineaarne, kui koormust läbiv vool ei ole enam puhtalt siinuseline. Kui koormuse impedants on perioodiliselt muutuv, siis elektrivoolu lainekuju on toiteallika pinge kujust palju erinev ehk mitte-siinuseline. Harmoonikud põhjustavad elektrivõrgus mitmeid negatiivseid efekte. Nendeks on: võimsusteguri halvenemine, mootori võimsuse vähenemine, kaablitel, trafodel ja mootoritel võib tekkida ülekoormus, kontaktorid võivad tõrkuda, mõõtesüsteemide vead. Pikemas perspektiivis lühendavad harmoonikud trafode ja kondensaatorpatareide talitlusiga. [20] Harmoonikud põhinevad Fourier` teisendustel. Fourier`i teisenduste põhjal on võimalik igasugust perioodilist funktsiooni kujutada reana  $U(t)$  valemiga 2.1, mis koosneb siinuseliselt erineva sagedusega muutuvatest komponentidest.  $U_h$  on pinge amplituud,  $h$  on harmooniku järku number,  $\omega_0$  on nurksagedus,  $\varphi_h$  on faasinihe ja  $t$  on aeg. [11]

$$U(t) = \sum_{h=1}^{\infty} U_h \sin(h \omega_0 t + \varphi_h) \quad (2.1)$$

kus  $U_h$  – harmoonilise komponendi pinge amplituud, V - volt

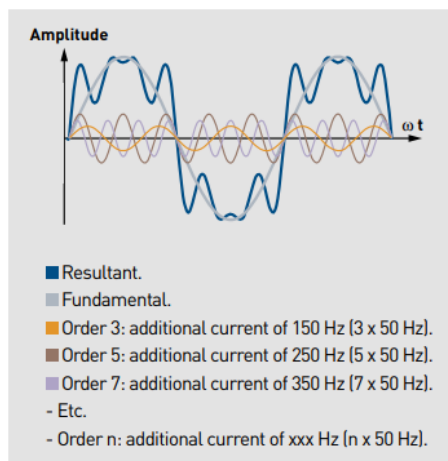
$H$  – harmooniku järku number

$\omega_0$  – nurksagedus, rad/s – radiaani/sekundis

$\varphi_h$  – faasinurk, ° - kraad

$t$  – aeg, s - sekund

Joonisel 2.2 on näidatud 3,5,7 järku harmoonikute lainekujud ja ka *fundamental*, ehk võrgusagedusega 50Hz lainekuju. Antud joonisel on *resultant* moonutatud lainekuju harmoonikute tulemusena.



Joonis 2.2 Harmoonikude lainekujud [21]

Moanutatud lainekujuga vool või pinge koosneb mitmetest harmoonikutest. Harmoonikute levikut võivad kondensaatorpatareide olemasolul oluliselt suurendada resonantsnähtused, mis sõltuvad lisaks ka aktiivkoormuse osakaalust ja võrgu impedantsist. Elektrivõrgu induktiivtakistus on sagedusega lineaarses sõltuvuses ning h-nda harmooniku korral on elektrivõrgu reaktiivtakistus  $X_{Lh}$  on arvutatav valemiga 2.2. [11]

$$X_{Lh} = 2\pi f_h L \quad (2.2)$$

kus  $f_h$  – harmooniku sagedus, Hz-hertz

$L$  – induktiivsus, H-henry

Kondensaatorpatarei reaktants  $X_{Ch}$  on pöördvõrdeliselt proportsionaalne sagedusega, mida on näha valemilt 2.3. [11]

$$X_{Ch} = \frac{1}{2\pi f_h C} \quad (2.3)$$

kus  $f_h$  – harmooniku sagedus, Hz-hertz

$C$  – mahtuvus, F-farad

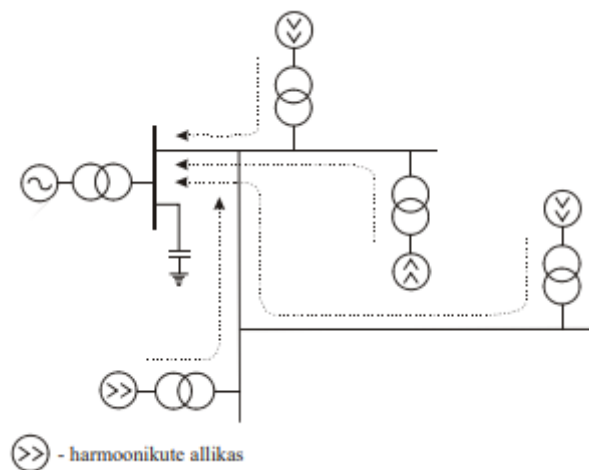
Mahtuvuslike ja induktiivseid komponente sisaldavas ahelas võib olla üks või mitu resonantssagedust, mille korral ahela induktiiv ja reaktiivtakistused on võrdsed. Resonantssagedus  $f_r$  avaldub valemiga 2.4. [11]

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (2.4)$$

kus  $L$  – induktiivsus, H-henry

$C$  – mahtuvus, F-farad

Olukorras, kus harmoonikute sagedus võrdub resonantssagedusega, võivad pinge ja voolu väärtused järsult tõusta. Joonisel 2.3 oleval elektrivõrgul võib esineda paralleelresonants, sest põikkondensaator on harmoonikute allika poolt paralleellülituses võrgu induktiivsusega. [11]



Joonis 2.3 Paralleelresonants [11]

Paralleel-resonantsi korral on võrgu näivtakistus harmoonikute allika poolt vaadatuna suur. Näivtakistus on võrdeline resonantsahela kvaliteediteguri  $q$  ja võrgu reaktantsi  $X_c$  korrutisega. Resonantsahela kvaliteeditegur  $q$  on võrgu reaktantsi ja aktiivtakistuse jagatis, mis võib muutuda oluliselt sõltuvalt harmoonikute allika asukohast võrgus. Kvaliteeditegur võib jääda piiridesse 5-30. Kondensaatorpatarei lähedal on pinge tugevalt suurenenud või moonutatud, sest paralleelresonantsi esinemisel põhjustab harmooniku vool selles suure pingelangu. Harmooniku poolt põhjustatud vool resonantsi ajal avaldub valemiga 2.5, kus  $I_h$  on harmooniku voolutugevus. Harmooniku vool on suurenenud  $q$  korda resonantssageduse korral, mis võib põhjustada kondensaatorpatarei riknemist või kaitsete läbipõlemist. [11]

$$I = qI_h \quad (2.5)$$

kus  $q$  – kvaliteeditegur

$I_h$  – harmooniku vool, A-amper

Resonantsiga seotud probleemide tekkimise vältimiseks hoitakse resonantsi sagedust võimalikult erinevat harmoonikute sagedustest, millel on suur amplituud. Seda on võimalik teha muutes elektrivõrgu komponentide induktiivseid ja mahtuvuslike takistusi. Kui võrgus on kondensaatorpatarei astmetega, siis tuleb arvestada mitme resonantsi tingimustega.



Kondensaatorpatareidele ühendatakse jadamisi lahkähälestusreaktorid iga kondensaatorpatarei astme ette, mis on häälestatud resonantsi sageduse järgi, ning selle sagedus on valitud kõige madalama järguga võrgus esineva harmooniku järgi. Elektrivõrgu induktiivne takistus ja kondensaatorpatarei-reaktori ühenduse impedants ei saa sellisel juhul resonantsi tekitada jada või paralleelresonantsi sageduste juures. Enne kondensaatorpatarei valikut ning reaktori vajaduse analüüsimist, tuleb elektrivõrgus tuvastada esinevad harmoonikud ning nende mõju. [22] Lisas 1 on toodud Jaoskonna AJ harmoonikute mõõtmiste tulemused. [14] Tüüpiliselt ei saa reaktoreid paigaldada olemasolevatele kondensaatorpatareidele võrgus, sest kondensaatorpatarei üldjuhul ei ole ette nähtud sellistele pingete ja voolude tõusule, mida reaktor põhjustab. Reaktori valikul tuleb lähtuda reaktorit läbivast voolust ning induktiivsusest. Induktiivsus valitakse nii, et reaktor oleks resonantsis kindlal sagedusel. [23] Näide lahkähälestusreaktorist on joonisel 2.4.



Joonis 2.4 LTEC 3-faasiline keskpinge reaktor [24]

### 3. TASUVUSE ANALÜÜS

#### 3.1 Reaktiivvõimsuse võrgutasu hind hetkel ja järgmisel perioodil

Võrgutasu ehk võrguteenuse hind katab elektrivõrgu ülalpidamiseks ja uuendamiseks vajalikke kulusi. Näiteks jaotusvõrgu ettevõtte Elektrilevi OÜ maksab ülekandevõrgu ettevõttele Elering 110kV pingel korral aktiivenergia tarbimisel tipuajal edastamistasu tariifi A1 või A3 alusel ja tipuvälisel ajal edastamistasu tariifi A3 või A4 alusel, vastavalt tarbimiskoha asukohale ning reaktiivenergiatasu reaktiivenergia tarbimisel ja võrku andmisel tariifi R alusel. Eleringi praeguste võrguteenuste hinnakirja on kinnitanud konkurentsiamet, mis jõustus 1. juuli 2017. [25] Antud hinnakiri on tabelis 3.1.

Tabel 3.1 Võrguteenuste hinnakiri [26]

Tähis	Nimetus	Võrgutasu	Ühik
A1	Edastamistasu pingel 110 kV (tipuajal)	14,04	EUR/MWh
A2	Edastamistasu pingel 110 kV (tipuvälisel ajal)	7,02	EUR/MWh
A3	Edastamistasu 110 kV trafo alampingepoolel (tipuajal)	15,26	EUR/MWh
A4	Edastamistasu 110 kV trafo alampingepoolel (tipuvälisel ajal)	7,63	EUR/MWh
A5	Edastamistasu pingel 330 kV	4,81	EUR/MWh
R	Reaktiivenergiatasu	1,54	EUR/Mvarh

Tipuaeg on perioodil 1. oktoober – 31. märts kellaaegadel 7:00-23:00 ja tipuväline aeg on väljaspool tipuaega. [26]

Põhivõrgu ettevõtte Elering on korraldanud põhivõrgu võrgutasu struktuuri muutmise avaliku konsultatsiooni, kus on välja pakutud uus reaktiivenergia võrgutasu hind. Antud avaliku konsultatsiooni eesmärgiks on muuta võrgutasu rohkem tarbimisvõimsuse ülevõltoimise põhiseks ning et ühiskond ei peaks kinni maksma ebamõistlikult suurte võimsuste ülevõltoimist riskide maandamiseks kohtades, kus see ei ole mõistlik. Tänapäevane võrgust võetava energia põhine võrgutasu ei indikeeri tegelikke võrgu varustuskindluse tagamise kulusid. Ülekandevõrk on muutumas üha enam varustuskindluse tagajaks, sest seoses tuleviku muutustega energiasüsteemis, sinna alla käib ka hajatootmine, salvestustehnoloogiad ja otseliinide kasutusele võtmine, ei ole ülekandevõrk tänapäeval ainult energia kandja. Uue tariifstruktuuri põhimõtteks on lisada energiakomponendile lisaks võimsuskomponent, mille arvestamise aluseks tuleb võtta võrgulepingutes sätestatud tarbimisvõimsus, ehk alajaama kaupa tarbimiskohtade tarbimisvõimsuste summa, mis on lisas 2

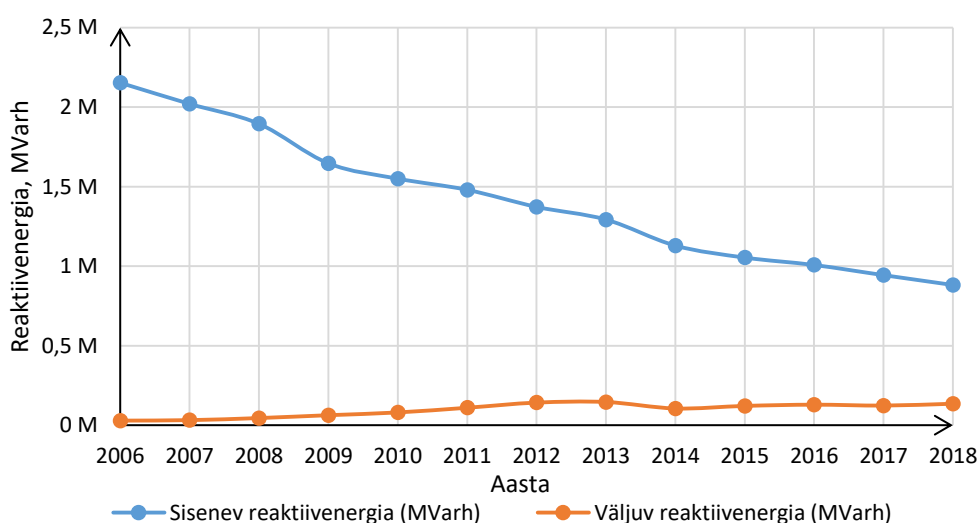
näidatud. Võrreldes praeguse hinnakirjaga, lisandub hinnakirja võimsustasu EUR/MVA/aastas ning hinnakirjast eemaldatakse tarbimisajast sõltuvad tipu ja tipuvälised energiatariifid. Võrku läbivast energiavoost on 10% Eleringi kuludest otseselt sõltuvad võrgukadudest. Eleringi ettepanek on kasutada võimsuskomponendi arvutamisel Eleringi kuludest kulumit ja põhjendatud tulukust, et vältida suurt muutust võimsuskomponendile üle minemisel. Antud jaotuse järgi on tariifide osakaaluks tänaste väärtuste juures 65% seotud võimsuskomponendiga ja 35% energiakomponendiga. Konsultatsioonis välja pakutud hinnakiri on tabelis 3.2, mis on näitlik ning põhineb tänastel andmetel. [27]

Tabel 3.2 Aasta 2021. näitlik võrguteenuse hinnakiri [27]

<b>Tähis</b>	<b>Nimetus</b>	<b>Võrgutasu</b>	<b>Ühik</b>
A1	Edastamistasu pingel 330 kV	2,82	EUR/MWh
V1	Võimsustasu pingel 330 kV	5969	EUR/MVA/aastas
A2	Edastamistasu pingel 110 kV	3,57	EUR/MWh
V2	Võimsustasu pingel 110 kV	10 212	EUR/MVA/aastas
A3	Edastamistasu 110 kV trafo alampingepoolel	3,9	EUR/MWh
V3	Võimsustasu 110 kV trafo alampingepoolel	10 735	EUR/MVA/aastas
R	Reaktiivenergitasu	0,51	EUR/MVarh

## 3.2 Reaktiivvõimsuse osakaal võrgus

Aastal 2018. sisenes jaotusvõrku 881 455 MVarh reaktiivenergiat ning väljus jaotusvõrgust põhivõrku 134 861 MVarh reaktiivenergiat. Võrreldes 2006. aasta andmetega, sisenes jaotusvõrku põhivõrgust 2 152 855 MVarh ning väljus võrgust 28 735 MVarh reaktiivenergiat. Kondensaatorpatareidega on vähendatud sisse ostetavat reaktiivvõimsust ligikaudu 60% aastaks 2018, võrreldes aastaga 2006. Arvestades praegust reaktiivenergiatasu, hoitakse kondensaatorpatareisid kasutades aastas kokku reaktiivenergia arvelt ligikaudu 2 miljonit eurot. Joonisel 3.1 on toodud sisenev ja väljuv reaktiivenergia aastate lõikes, kus näha on kui palju on võrku sisenev reaktiivenergia vähenenud aastaks 2018. [14]



Joonis 3.1 Sisenev ja väljuv reaktiivenergia Elektrilevi võrgus aastal 2006-2018.

Väljuva reaktiivenergia tõus on tingitud peamiselt paljas juhtmete asendamisega kaabelliinide vastu, mis genereerivad reaktiivenergiat võrku palju rohkem kui paljas-juhtmed õhuliinidel. Vähesel määral on ka tingitud väljuva reaktiivenergia tõus reaktiivvõimsus ülekompenseerimise tõttu jaotusvõrgus ja ka tarbijate enda reaktiivvõimsuse kompenseerimise pärast. [14] Tabelis 3.3 on välja toodud 5 alajaama, kuhu sisenev reaktiivenergia R+ aastal 2018 oli kõige suurem ja lisaks sisenev aktiivenergia A+.

Tabel 3.3 Alajaamad, kuhu sisenev reaktiivenergia oli suurim aastal 2018 [14]

Alajaam	R+ (MVarh)	A+ (tipuaeg) (MWh)	A+ (tipuväline aeg) (MWh)	A+ (kogu) (MWh)
Alajaam 1	17 893	8 850	9 106	17 955
Alajaam 2	14 413	24 941	36 950	61 892
Alajaam 3	14 040	22 041	29 843	51 884
Alajaam 4	12 703	30 622	45 443	76 064
Alajaam 5	12 498	9 493	41 634	51 127

## 3.3 Kondensaatorpatarei paigaldamise hinna kujunemine ja talitlusiga

### 3.3.1 Kondensaatorpatarei talitlusiga

Kondensaatorpatarei talitlusiga mõjutab peamiselt töötemperatuur, pinged ja vool. Talitlusea maksimeerimiseks tuleb enne kondensaatorpatarei valikut kindlaks teha voolud, pinged, muud eripärad elektrisüsteemis, mis võivad esineda ja ka kondensaatorpatarei enda parameetrid. Tüüpiliselt on kondensaatorpatareid projekteeritud oodatava talitlusega 20. aastat, kuid reaalses olukorras kestavad vähem, sest ei ole arvestatud projekteerimisel pingete ja voolude suurustega elektrivõrgus või muude asjaoludega nagu näiteks harmoonikute esinemisega elektrivõrgus. [28] Elektrilevi OÜ seisukohalt tuleb arvestada peatükis 2.1 nõuetega, et maksimeerida talitlusiga ja normaalne talitus. Elektrilevi OÜ kogemuse põhjal on kõige lühem talitlusiga olnud 4 aastat ühe tootja kondensaatorpatareidel. Rikete põhjust täpselt välja ei selgitatud, kuid analüüsimisest võis järeldada, et kondensaatoritele valiti liiga madal nimipinge ja probleeme oli tootekvaliteediga. Kõige vanemad kondensaatorid Elektrilevi OÜ jaotusvõrgus on 2019. aasta seisuga 13 aastat vanad. [14] Mõningate tootjate poolt pakutud talitlusead kondensaatorpatareidele on tabelis 3.4.

Tabel 3.4 Kondensaatorpatareide tootjate pakutud talitlusead kondensaatorplokkidele tava talitluses

Tootja	Talitlusiga (aastat)
Circuitor [29]	15+
ZEZ Silko [30]	17+
ABB [31]	30+
The Legrand Group [21]	20+

### 3.3.2 Kondensaatorpatarei paigaldamise hind

Kondensaatorpatarei hind sõltub eelkõige kondensaatorplokkide võimsusest ja peatükis 2. esitatud tingimustest. Paigaldamise hind kujuneb paigaldamise keerukusest, tingimustest ja võrgus esinevatest olukordadest, mis suurendavad paigaldamise hinda. Näiteks harmoonikute esinemine elektrivõrgus, mille korral tuleb kondensaatorpatarei paigaldamise hinna sisse arvestada ka abinõud harmoonikute piiramiseks või paigaldada kondensaatorpatarei, mis on mõeldud harmoonikutega võrku paigaldamiseks ja see teeb kondensaatorpatarei hinna oluliselt kallimaks. Tabelis 3.5 on hinnapakumise tabel 10 kV kondensaatorite võimsusega 0,5+0,8 MVar ja võimsusega 1,2+0,8+0,4 MVar paigaldamise kohta. [14]

Tabel 3.5 Hinnapakkumise tabel [14]

TARNE/TÖÖ KIRJELDUS	Maht kokku	Ühiku hind (€)	Hind kokku (€)
<b>Üldosa</b>			
Projekti juhtimine	1	4 000	4 000
Elektrilise osa projekt	1	780	780
Ehitusliku osa projekt	1	750	750
Elektrilise osa teostusjoonised	1	350	350
Ehitusliku osa teostusjoonised	1	350	350
<b>Ehitusosa</b>			
Kondensaatorite ruumi ümberehitus	1	3 550	3 550
<b>Kõrgpingeseadmed</b>			
Kondensaator	2	74 000	148 000
Jõukaabel, sidumine jaotusseadmega	1	2 900	2 900
Muud kõrgepinge seadmed ja materjalid	1	10 200	10 200
Paigaldamine, seadistamine, testimine ja FAT	1	10 680	10 680
<b>Releekaitseadmed</b>			
Kondensaatori releekaitse ja automaatika	1	9 450	9 450
Releekaitse paneelid ja klemmkapid	1	1 200	1 200
Sekundaarkaablid	1	950	950
Muud kaitse- ja automaatikaseadmed	1	950	950
<b>Juhtimis- ja seireadmed</b>			
RTU	1	500	500
Muud juhtimis- ja seireadmed	1	300	300
Juhtimiskaablid	1	150	150
Paigaldamine, seadistamine ja testimine	1	360	360
<b>Sideseadmed</b>	1	50	50
<b>Tulekustutussüsteem</b>	1	1 000	1 000
<b>HIND KOKKU</b>			<b>196 470</b>

### 3.4 Reaktiivvõimsuse kompenseerimise tasuvuse analüüs

Elektrilevi OÜ kompenseerib võrku sisenevat reaktiivvõimsust tariifist tulenevate kulude vähendamiseks. Kondensaatorpatareid paigaldatakse keskpinge võrgu alajaama latile, kus tagatakse keskpinge võrgu tarbijatele reaktiivvõimsus ning sellisel tsentraalsel kompenseerimise viisil on vaja Eleringi põhivõrgust reaktiivvõimsust sisse osta minimaalselt. Analüüsi lähteandmed võetakse eelnevate peatükkide andmetest ja analüüsitakse Alajaam 1 näitel, kus aastal 2018 oli kõige suurem reaktiivenergia tarbimine Elektrilevi OÜ-s. Peatükis 3.1 kirjeldatud võrgutasu muutmise avaliku konsultatsiooni järgi muutub reaktiivenergiatasu aastaks 2021 pea kolm korda soodsamaks. Uue tariifstruktuuri järgi lisandub energiakomponendile lisaks võimsuskomponent ning eemaldatakse tarbimisajast sõltuvad tipu ja tipuvälised energiatariifid. Analüüsis arvutatakse hetke ja tuleviku võrgutasu põhjal aastane kogumaksumus alajaama tarbimisandmete põhjal ja reaktiivvõimsuse kompenseerimise tasuvus, arvestades ka asjaolu, et võimsuskomponenti on võimalik reaktiivvõimsuse kompenseerimisel vähendada. Peatükist 3.2 saadakse aastane reaktiivenergia alajaama 1 kohta. Arvutustel kasutatakse ka Lisas 3 graafikul toodud hetkvõimsusi alajaama 1 kohta optimaalse tarbimiskoha võimsuse jaoks. Alajaam 1 tarbimiskoha võimsus on 40 MVA praeguse võrgulepingu järgi. [14] Peatükist 3.3 kondensaatorpatarei paigaldamise hinnaks *KPH* võetakse 200 000 EUR-i ja eeldatav lubatud talitlusiga *TE* kondensaatorpatareile 20 aastat.

#### 3.4.1 Hetke hinnakiri

Elektrilevi OÜ tasub elektrienergia eest tabeli 3.1 järgi. Alajaamas 1 on tarbimiskoht 110 kV trafo alampingepoolel, seega analüüsis kasutatakse tariife *A3* ja *A4*. Reaktiivenergiatasu on *R*. Lähteandmed on tabelis 3.6 esitatud.

Tabel 3.6 Lähteandmed hetke võrgutasu analüüsis Alajaama 1 kohta

<b>R<sub>sisenev</sub> (Mvarh)</b>	<b>A<sub>tipuaeg</sub> (MWh)</b>	<b>A<sub>tipuväline aeg</sub> (MWh)</b>	<b>A3 EUR/MWh</b>	<b>A4 EUR/MWh</b>	<b>R EUR/Mvarh</b>
17 893	8 850	9 106	15,26	7,63	1,54

Alajaama 1 kogu võrgutasu *VT* aastal 2018. on arvatav valemiga 3.1, kus tabelist 3.6 tariifid korrutatakse aastase energia tarbimisega, vastavalt energia liigile ning tarbimiskohale.

$$\begin{aligned} VT &= A3 \cdot A_{tipuaeg} + A4 \cdot A_{tipuväline aeg} + R \cdot R_{sisenev} = \\ &= 15,26 \cdot 8\,850 + 7,63 \cdot 9\,106 + 1,54 \cdot 17\,893 = 232\,085 \text{ €} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Reaktiivvõimsuse kompenseerimise tasuvuse arvutuseks arvutatakse aastane reaktiivenergia tasu *RT* valemiga 3.2, kus aastane reaktiivenergia kogus korrutatakse reaktiivenergiatasuga.

$$RT = R \cdot R_{\text{sisenev}} = 1,54 \cdot 17\,893 = 27\,555 \text{ €} \quad (3.2)$$

Tasuvusaja  $T$  saab arvutada valemiga 3.3, võttes kondensaatorpatarei paigaldamise hinnaks  $KPH$  200 000 eurot.

$$T = \frac{KPH}{RT} = \frac{200\,000}{27\,555} = 7,25 \text{ aastat} \quad (3.3)$$

Eeldades, et kondensaatorpatarei töötab oma lubatud talitlusea  $TE$  20 aastat ilma riketeta, kompenseerib kogu reaktiivvõimsuse täpselt ja 20 aasta jooksul reaktiivenergia hind ei muutu, avaldub kasum või kahjum  $K$ , mis saadakse reaktiivvõimsuse kompenseerimisest kondensaatorpatareiga, valemiga 3.4.

$$K = (TE - T) \cdot RT = (20 - 7,25) \cdot 27\,555 = 351\,104 \text{ €} \quad (3.4)$$

Antud arvutustest võib järeldada, et hetke võrgutasude hinnakirja põhjal tasub reaktiivenergiat kompenseerida kondensaatorpatareidega Elektrilevi OÜ-l tingimusel, et tasuvusaeg jääb alla 20 aasta, ehk kondensaatorpatarei paigaldamise hinna ja aastase reaktiivenergia maksumuse suhe oleks alla 20 aasta. Kondensaatorpatarei peaks riketeta võrgus talitlema vähemalt 8 aastat Alajaama 1 korral, et reaktiivvõimsuse kompenseerimise arvelt Elektrilevi OÜ jääks kasumisse.

### 3.4.2 Elering AS ülekandeteenuse järgmise perioodi näitlik hinnakiri

Uue tariifstruktuuri järgi lisandub energiakomponendile lisaks võimsuskomponent ning eemaldatakse tarbimisajast sõltuvad tipu ja tipuvälised energiatariifid. Analüüsis arvatatakse järgmise perioodi näitliku võrgutasu põhjal aastane-kogumaksumus alajaama tarbimisandmete põhjal ja reaktiivenergia kompenseerimise tasuvus, arvestades ka asjaolu, et võimsuskomponenti on võimalik reaktiivenergia kompenseerimisel vähendada. Alajaamas 1 on tarbimiskoht 110 kV trafo alampingepoolel tarbimiskoha võimsusega 40 MVA, seega analüüsis kasutatakse tariife A3 ja V3 ning reaktiivenergiatasu on  $R$ . Lähteandmed on tabelis 3.7 esitatud. Võrguteenuse hinnakiri on võetud tabelist 3.2.

Tabel 3.7 Lähteandmed

$R_{\text{sisenev}}$ (Mvarh)	$A_{\text{kogu}}$ (MWh)	Tarbimiskoha võimsus TV (MVA)	A3 EUR/MWh	V3 EUR/MWh	R EUR/Mvarh
17 893	17 955	40	3,90	10 735	0,51



Kogu alajaama võrgutasu  $VT$  aastal 2018 järgmise perioodi näitliku hinnakirja on arvatav valemiga 3.5.

$$\begin{aligned} VT &= A3 \cdot A_{kogu} + V3 \cdot TV + R \cdot R_{sisenev} = \\ &= 3,90 \cdot 17\,955 + 10\,735 \cdot 40 + 0,51 \cdot 17\,893 = 508\,553 \text{ €} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Reaktiivvõimsuse kompenseerimise tasuvuse arvutuseks arvutatakse aastane reaktiivenergia tasu  $RT$  valemiga 3.2.

$$RT = R \cdot R_{sisenev} = 0,51 \cdot 17\,893 = 9125 \text{ €} \quad (3.2)$$

Tasuvusaja  $T$  saab arvutada valemiga 3.3, võttes kondensaatorpatarei paigaldamise hinnaks  $KPH$  200 000 eurot.

$$T = \frac{KPH}{RT} = \frac{200\,000}{9\,125} = 22 \text{ aastat} \quad (3.3)$$

Eeldades, et kondensaatorpatarei töötab oma lubatud talitlusea  $TE$  20 aastat ilma riketeta ja 20 aasta jooksul reaktiivenergia hind ei muutu, avaldub kasum või kahjum  $K$ , mis saadakse reaktiivvõimsuse kompenseerimisest kondensaatorpatareiga, valemiga 3.4.

$$K = (TE - T) \cdot RT = (20 - 22) \cdot 9\,125 = -17\,491 \text{ €} \quad (3.4)$$

Antud arvutustest võib järeldada, et avalikus konsultatsioonis välja pakutud uue reaktiivenergia tariifi eest ei tasu reaktiivenergiat kompenseerida ning kogu võrgutasu suureneb oluliselt. Eleringi avaliku konsultatsiooni põhimõtte on vähendada ebamõistlikult suurte võimsuste ülevõimist kohtades, kus see ei ole mõistlik. Antud olukorras on alajaamal 1 tarbimiskoha võimsus 40 MVA, mis on alajaama trafo maksimaalse lubatud näivvõimsuse järgi sätestatud. Lisas 3 toodud graafikult on näha, et aastal 2018. maksimaalne näivvõimsus oli ligikaudu 9 MVA Alajaamas 1. Seega uue tariifisüsteemi tõttu peab Elektrilevi OÜ sätestama uued tarbimiskoha võimsused, mis vastaksid rohkem tegelikule tarbimisvõimsusele. Lisaks võib eeldada, et Elektrilevi OÜ-l on võimalik raha kokku hoida reaktiivvõimsust kompenseerides tarbimiskoha võimsuse tõttu, sest alajaamas 1 näivvõimsus sisaldab väikest osa reaktiivvõimsust. Kompenseerides reaktiivvõimsuse alajaamas 1, on võimalik vähendada tarbimiskoha võimsust ja seeläbi vähendada kogu aastast võrgutasu maksumust. Aktiivvõimsuse, reaktiivvõimsuse ja näivvõimsuse maksimaalsed väärtused ümardatult alajaama 1 kohta aastal 2018 on toodud tabelis 3.8, mille andmed on võetud lisas 3 olevalt graafikult.

Tabel 3.8 Võimsused

P (MW)	Q (Mvar)	S (MVA)
8,3	3,4	9
8,3	0	8,3

Näivvõimsus  $S$  tabelis 3.8 on arvatud valemiga 1.6

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{8,3^2 + 3,4^2} = 9 \text{ MVA} \quad (1.6)$$

Tarbimiskoha võimsuse vähendamisega reaktiivenergia kompenseerimise arvelt, saab arvutada aastase maksumuse  $RT_{tk}$ , mis kulus võimsuskomponendi peale reaktiivenergia arvelt, valemiga 3.6, kus  $S_1$  on 9 MVA ja  $S_2$  on 8,3 MVA.

$$RT_{tk} = (S_1 - S_2) \cdot V3 = (9 - 8,3) \cdot 10\,735 = 7\,514 \text{ €} \quad (3.6)$$

Lisades  $RT_{tk}$  reaktiivenergia kompenseerimise tasuvuse arvutusse, saab järgmised tulemused:

Reaktiivvõimsuse kompenseerimise tasuvuse arvutuseks arvutatakse aastane reaktiivenergia tasu  $RT$  valemiga, kuhu sisse arvestatakse ka  $RT_{tk}$ , valemiga 3.7.

$$RT = R \cdot R_{sisenev} + RT_{tk} = 0,51 \cdot 17\,893 + 7\,514 = 16\,639 \text{ €} \quad (3.7)$$

Tasuvusaja  $T$  saab arvutada valemiga 3.3, võttes kondensaatorpatarei paigaldamise hinnaks  $KPH$  200 000 eurot.

$$T = \frac{KPH}{RT} = \frac{200\,000}{16\,639} = 12 \text{ aastat} \quad (3.3)$$

Eeldades, et kondensaatorpatarei töötab oma lubatud talitlusea  $TE$  20 aastat ilma riketeta ja 20 aasta jooksul reaktiivenergia hind ei muutu, avaldub kasum või kahjum  $K$ , mis saadakse reaktiivvõimsuse kompenseerimisest kondensaatorpatareidega, valemiga 3.4.

$$K = (TE - T) \cdot RT = (20 - 12) \cdot 16\,639 = 133\,112 \text{ €} \quad (3.4)$$

Antud tulemustest saab järeldada, et reaktiivvõimsust tasub kompenseerida, kui arvesse võtta võimsuskomponendi vähenemine reaktiivvõimsuse arvelt, kuid reaalses olukorras tuleb siiski valida tarbimiskoha võimsus varuga, sest peale alajaama siseneva võimsuse tuleb arvestada ka teiste faktoritega. Alajaamad peavad olema reserveeritavad ning olema suutelised võimsuse poolest reserveerima teisi alajaamu rikete, rekonstrueerimiste korral, mis ajal võib tõusta näivvõimsus palju kõrgemaks, kui kokku lepitud tarbimiskoha võimsus. Lisaks ei saa tarbimiskoha võimsuse valikul eeldada, et kondensaatorpatarei talitleb kogu aja ilma riketeta, on alati täpselt astmeliselt reguleeritud ning kondensaatorpatarei paigaldise hulka kuuluvad seadmed nagu näiteks

võimsuslülitid või kontaktorid talitlevad raketeta. Sellisel juhul võib kondensaatorpatarei võrgust lahutatud olla pikka aega ja näivvõimsus on suurem. Elektrilevi OÜ kogemuse põhjal kõige lühema talitlusega kondensaatorpatareid on talitlenud vaid 4 aastat ning kõige pikema talitlusega, 13 aastat vanad kondensaatorid, talitlevad jätkuvalt hetkel võrgus, 2019 aasta seisuga. Lähtudes sellest, on keeruline määrata kondensaatorpatarei talitlusiga, sest see sõltub suuresti elektrivõrgu olukorrast, võimalikest anomaaliatest võrgus ja kondensaatorpatareide tootekvaliteedist. Lisaks on enamikes alajaamades reaktiivvõimsuse hetkvõimsus maksimaalselt 1-2 MVar, mis ei mõjuta oluliselt näivvõimsust, ning seeläbi tõstab vähesel määral kompenseerimise tasuvust.

Reaktiivvõimsuse kompenseerimine kondensaatorpatareidega tasub ära uue hinnakirja järgi alajaamas 1 alates juhul, kui aastane sisenev reaktiivenergia on 19 608 MVarh. Antud tulemus on arvutatud valemiga 3.8, kus kondensaatorpatarei paigaldamise hind  $KPH$  on jagatud reaktiivenergia tasu  $R$  ja kondensaatorpatarei lubatud talitlusea  $TE$ -ga.

$$R_{sisenev} = \frac{KPH}{R \cdot TE} = \frac{200\,000}{0,51 \cdot 20} = 19\,608 \text{ MVarh} \quad (3.8)$$

Üldiselt peab kehtima võrrand 3.9, et reaktiivvõimsuse kompenseerimine kondensaatorpatareidega tasuks ära. Tasuvusaeg  $T$ , mis on võrdeline kondensaatorpatarei paigaldamise hinna  $KPH$  ja aastase reaktiivenergia tasu suhtega, peab olema väiksem kondensaatorpatarei talitluseast  $TE$ .

$$T = \frac{KPH}{R_{sisenev} \cdot R} \leq TE \quad (3.9)$$

Kokkuvõtlikult saab analüüsist järeldada, et antud andmete põhjal ei tasu kondensaatorpatareidega reaktiivvõimsust kompenseerida Elering AS avalikus konsultatsioonis välja pakutud järgmise perioodi näitliku hinnakirja ja struktuuri järgi. Tabelis 3.9 on toodud kokkuvõtlik tabel analüüsi tulemustest.

Tabel 3.9 Analüüsi tulemused Alajaam 1 kohta.

	Hetke võrgutasu	Avaliku konsultatsiooni võrgutasu	
	Hetke olukord	Hetke olukord	Kaaludes võimsuskomponenti
<b>Aastane reaktiivenergia tasu (€)</b>	2 755	9 125	16 639
<b>Tasuvusaeg (a)</b>	7	22	12
<b>Kasum/kahjum 20a (€)</b>	351 104	-17 491	133 112

## KOKKUVÕTE

Lõputöö eesmärk oli analüüsida, kas Elektrilevi OÜ-l tasub reaktiivvõimsust kompenseerida kondensaatorpatareidega hetke võrguteenuste hinnakirja põhjal ja Elering AS avalikus konsultatsioonis välja pakutud ülekandeteenuste võrgutasu järgmise perioodi struktuuri meetodika põhjal, kus lisatakse ülekandetasule võimsuskomponent ja reaktiivenergiatasu on kolm korda odavam võrreldes Eleringi praeguste võrguteenuste hinnakirjaga.

Elektrilevi OÜ kompenseerib reaktiivvõimsust kondensaatorpatareidega keskpingevõrgu alajaama lattidel eesmärgiga tariifist tulenevate kulude vähendamiseks. Sellisel tsentraalsel kompenseerimise viisil tagatakse kondensaatorpatareidega tarbijate reaktiivvõimsuse vajadus tarbijale lähemal ning Elering AS põhivõrgust ei pea reaktiivvõimsust sisse ostma. Esimeses peatükis antakse ülevaade reaktiivvõimsuse olemusest ja kondensaatorpatareidest ning lisaks kuidas kondensaatorpatareid kompenseerivad reaktiivvõimsust. Töö teises peatükis antakse ülevaade kondensaatorpatareide paigaldamisest jaotusvõrgus ning milliste tingimustega ja olukordadega tuleb arvestada. Töö kolmas peatükk ja ühtlasi kõige tähtsam peatükk analüüsib reaktiivvõimsuse kompenseerimise tasuvust kondensaatorpatareidega. Antakse ülevaade võrgutasust hetkel ja plaanitavast võrgutasust järgmisel perioodil, reaktiivvõimsuse osakaalust jaotusvõrgus ning tuuakse välja suurimad reaktiivvõimsuse tarbijad alajaamade kaupa kuidas kujuneb kondensaatorpatarei paigaldamise hind. Kolmanda peatüki neljandas alapeatükis teostatakse tasuvuse analüüs toetudes eelnevates peatükkides ja alapeatükkides käsitletule.

Lõputöös teostatud analüüsist selgus, et reaktiivenergiat tasub kompenseerida Elektrilevi OÜ-l kondensaatorpatareidega hetke võrguteenuste hinnakirja järgi, eeldusel, et kondensaatorpatarei paigaldamise hinna ja aastase reaktiivenergia maksumuse suhe oleks alla kondensaatorpatarei lubatud talitlusea ja kondensaatorpatarei oleks koguaeg astmeliselt õigesti reguleeritud. Antud arvutustes kasutatud lähteandmete ja eelduste põhjal saab järeldada, et kondensaatorpatarei paigaldamine reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks tasub ära 8 aastaga. Kokkuvõtlikult Elering AS avalikus konsultatsioonis välja pakutud uue tariifisüsteemi järgi ei tasu Elektrilevi OÜ-l reaktiivenergiat kondensaatorpatareidega kompenseerida. Esiteks reaktiivenergia tasu alaneb ligi kolm korda ning analüüsist teostatud arvutuste põhjal tasub kondensaatorpatarei paigaldamine alles 22 aastaga ära, eeldusel, et kondensaatorpatarei töötab ilma rikeeta 22 aastat. Elektrilevi OÜ näitel on kõige lühema talitluseaga kondensaatorpatareid olnud jaotusvõrgu talitluses vaid 4 aastat ja pikima talitluseaga 13 aastat. Teiseks on reaktiivvõimsusel vähene mõju näivvõimsusele ja seeläbi vähene mõju uue tariifisüsteemi võimsuskomponendile. Antud analüüsi arvutustes kasutatud andmete põhjal ning eeldusel, et tarbimiskoha võimsus valitakse täpselt tipukoormuse järgi, tasub

reaktiivvõimsust kondensaatorpatareidega kompenseerida, kuid reaalsel tarbimiskoha võimsuse valikul ei saa eeldada, et kondensaatorpatareil ega lülititel ei toimuks rikkeid, ning vastavalt sellele ei peaks tarbimiskoha võimsuse valikul arvestama reaktiivvõimsust, mis kompenseeritakse kondensaatorpatareidega, sest kondensaatorpatarei või selle koosseisu kuuluvate seadmete vahetus ja remont ei ole kiire protsess üldjuhul. Lisaks peab tarbimiskoha võimsus olema suurem, kui reaalne tipukoormuse näivvõimsus normaalrežiimil, sest alajaamad peavad olema suutelised võimsuse poolest reserveerima teisi alajaamu rikete, rekonstrueerimiste korral, mis ajal võib tõusta näivvõimsus palju kõrgemaks, kui normaalrežiimil.

Käesolev töö annab hea ülevaate reaktiivvõimsuse kompenseerimisest, kondensaatorpatareidest ning reaktiivvõimsuse kompenseerimise tasuvuse analüüsist kondensaatorpatareidega Elektrilevi OÜ näitel. Lisaks ka ülevaate Elering AS järgmise perioodi võrgutasu struktuuri metoodikast. Töös teostatud analüüs on pigem lihtanalüüs ja ei kehti igas olukorras, sest tasuvuse analüüs sõltub mitmetest faktoritest, mida kõike ei saa üldistavalt käsitleda ja töös käsitletud avalikus konsultatsioonis välja pakutud järgmise perioodi võrgutasu muudatus on näitlik, mitte lõplik. Edasi võiks uurida reaktiivvõimsuse kompenseerimise muid lahendusi, mida antud lõputöös ei käsitletud, nagu näiteks individuaalne kompenseerimise viis, kus reaktiivvõimsuse tarbija kompenseerib reaktiivvõimsuse kohapeal.

## SUMMARY

The aim of the thesis was to analyze whether Elektrilevi OÜ should compensate reactive power with capacitor banks based on the current network service charges and on the methodology of the next period structure of the network service charges proposed in the public consultation of Elering AS, where the power component is added to the network service charges and the reactive energy charge is three times cheaper than Elering AS's current network service charges.

Elektrilevi OÜ compensates reactive power with capacitor banks in the substations of the medium voltage networks to reduce the cost of the tariff. This kind of central compensation ensures the consumers need of reactive power with capacitor banks on the site and this way there is no need to buy reactive power from Elering AS network. The first chapter gives an overview of the nature of reactive power and capacitor banks, as well as how capacitor banks compensate reactive power. The second chapter gives an overview of the instalment of capacitor banks in distribution systems and what conditions and situations are needed to be considered. The third and also the most important chapter of the work analyzes profitability of reactive power compensation with capacitor banks. The chapter gives an overview of the network charges at the moment and the planned network charges for the next period, the share of reactive power in distribution systems and the highest reactive power consumers by substations. In the fourth subchapter, profitability analysis is made based on the previous chapters and sub-chapters.

Analysis of profitability shows that it is profitable to compensate reactive power with capacitor banks based on current network charges, provided that the ratio of the cost of capacitor bank instalment to the annual reactive energy cost is below capacitor banks lifetime and capacitor bank steps are adjusted correctly step by step. Based on the data and assumptions used in these calculations, it can be concluded that installing a capacitor bank to compensate reactive power will pay off in 8 years. In summary, according to the new tariff system proposed by Elering AS in the public consultation, it is not profitable to compensate reactive energy with capacitor banks on the example of Elektrilevi OÜ. First, the reactive energy charge is reduced nearly three times, and based on the calculations made in the analysis, installing a capacitor banks pays off in 22 years, provided that capacitor bank lifetime is 22 years. According to the example of Elektrilevi OÜ, the capacitor banks with the shortest life has been 4 years. Secondly, reactive power has little to no effect on apparent power and thus has little effect on the power component of the new tariff system. Based on the data used in the calculations of this analysis and assuming that the power of the place of consumption is chosen precisely by peak load, it is profitable to compensate reactive power with capacitor banks. However, in the actual choice of the power for the place of consumption, it cannot

be assumed that the capacitor banks or switches will not malfunction and based on that to assume it is not needed to take reactive power into account when choosing this power as the replacement and repair of capacitor bank and its components is not quick. In addition, power of the place of consumption must be greater than the real peak load power, since the substations must be able to reserve other substations in terms of power in case of failures or reconstructions.

The work provides a good overview of reactive power compensation with capacitor banks and also profitability analysis on the example of Elektrilevi OÜ. It is a simple analysis and does not apply to every situation, because the profitability analysis depends on number of factors that cannot be dealt with in a general way and the planned tariff system for the next period is exemplary not final. Further, other solutions for the reactive power compensation could be studied, which were not addressed in this thesis, such as individual compensation, where the consumer compensates reactive power in place.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] J. Järvik, Üldelektrotehnika, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2014.
- [2] Lepingu nr OÜJVJUH-0913-19/LEP9019 lõpparuanne, „OÜ Jaotusvõrk reaktiivenergia ja -võimsuse tariifide kujunemise ja rakendamise põhimõtted,“ TTÜ Elektroenergeetika instituut, Tallinn, 2009.
- [3] J. C. Das, „Application of shunt capacitor banks,“ *Power System Harmonics and Passive Filter Designs*, John Wiley & Sons, Inc., 2015, pp. 453-502.
- [4] J. Matias, „Reactive Power Compensation,“ 5. Juuni 2013. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://new.abb.com/docs/librariesprovider78/chile-documentos/jornadas-tecnicas-2013--presentaciones/4-jos%C3%A9-matias---reactive-power-compensation.pdf?sfvrsn=2>. [Kasutatud 24. Aprill 2019].
- [5] H. Esop, H. Hellam, R. Hollmann, H. Jänes, E. Kanasaar, A. Kroon, P. Plakk, E. Puusepp ja H. Riikoja, Üldine elektrotehnika, Tallinn: Eesti riiklik kirjastus, 1954.
- [6] R. Lehtmets, „Elektrotehnika alused,“ 2001. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [http://www.ene.ttu.ee/leonardo/elektro\\_alused/5Elektrimahtuvus.pdf](http://www.ene.ttu.ee/leonardo/elektro_alused/5Elektrimahtuvus.pdf). [Kasutatud 20. Mai 2019].
- [7] Power Electronics, „Capacitor Discharge Resistor Mounts Easily,“ 26. Märts 2015. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.powerselectronics.com/passive-components/capacitor-discharge-resistor-mounts-easily>. [Kasutatud 25. Aprill 2019].
- [8] „Zamber,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.zamber.it/en/home>. [Kasutatud 25. Aprill 2019].
- [9] Tallinna Tehnikaülikool ja Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut, „Reaktiivvõimsuse kompenseerimine Eesti elektrisüsteemis,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://elering.ee/sites/default/files/attachments/20180220\\_reaktiivv%C3%B5imsuse\\_aruanne\\_v2\\_Limited.pdf](https://elering.ee/sites/default/files/attachments/20180220_reaktiivv%C3%B5imsuse_aruanne_v2_Limited.pdf). [Kasutatud 3. Mai 2019].
- [10] R. E. Fehr, „Power factor correction,“ *Industrial Power Distribution*, John Wiley & Sons, Inc., 2016, pp. 319-333.
- [11] M. Meldorf, H. Tammoja, Ü. Treufeldt ja J. Kilter, Jaotusvõrgud, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2007.
- [12] V. Egorov ja E. Saareoks, Kondensaatorseadmete kasutamine võimsusteguri tõstmiseks ja nende võimsuse automaatne reguleerimine, Tallinn: Valgus, 1959.
- [13] Elektrilevi, „Kondensaatorpatareide juhtimispõhimõtted ELV alajaamades“.
- [14] Elektrilevi OÜ sisesed andmed ja dokumendid
- [15] ZEZ-Silko, „Power Factor Correction,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.zez-silko.com/customzone/files/pfcnew.pdf>. [Kasutatud 14. Aprill 2019].
- [16] E. Altpere, A. Hansson, K. Hein ja E. Kändler, Elektrimontööri käsiraamat, Tallinn: Valgus, 1988.
- [17] Elektrilevi OÜ, „Nõuded keskpinge kondensaatoritele,“ 2015.

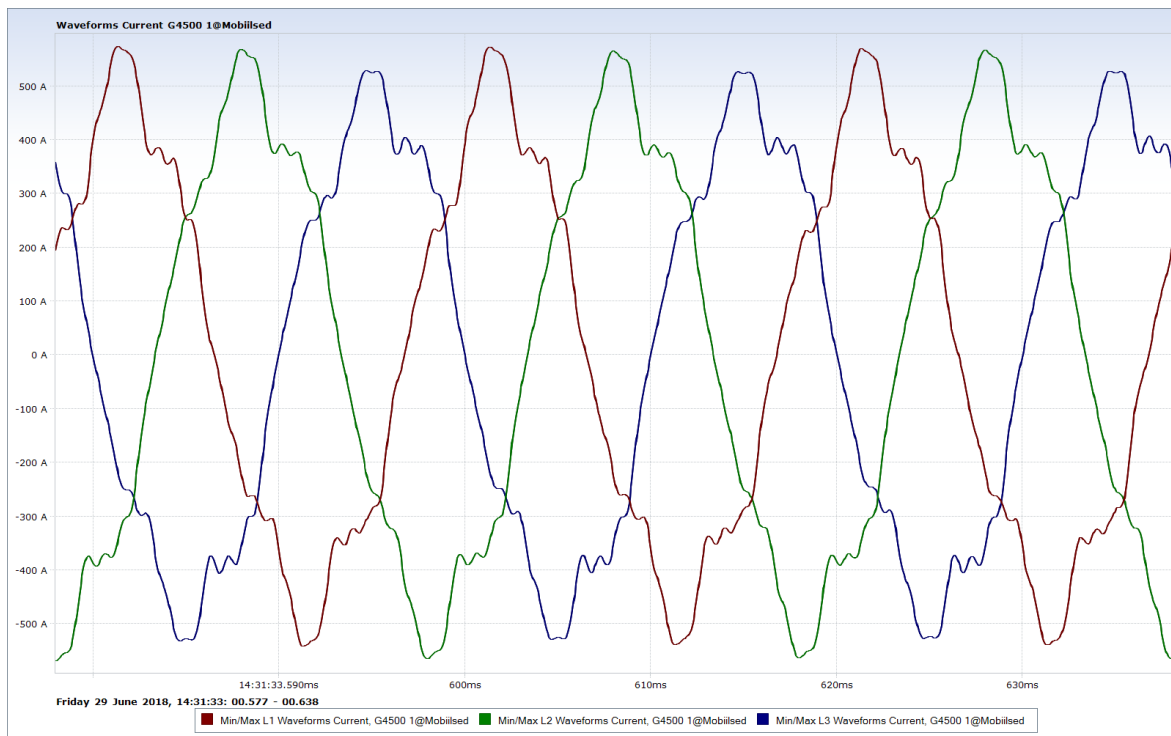


- [18] Eesti standardikeskus, „Shunt capacitors for a.c. power systems having a rated voltage above 1 000 V - Part 1: General“. Standard EVS-EN 60871-1, 2014.
- [19] T. Lehtla ja T. Vinnal, Elektrivarustuse tulevikuvisionid, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2016.
- [20] J. C. Das, „Effects of harmonics,“ *Power System Harmonics and Passive Filter Designs*, John Wiley & Sons, Inc., 2015, pp. 331-378.
- [21] Alpes Technologies, „Legrand,“ Automatic Capacitor Banks, [Võrgumaterjal]. Saadaval: [http://www.export.legrand.com/files/fck/pdf-EN/EXB17031\\_EN\\_GB.pdf](http://www.export.legrand.com/files/fck/pdf-EN/EXB17031_EN_GB.pdf). [Kasutatud 18. Aprill 2019].
- [22] R. E. Fehr, „Chapter 12: Power quality,“ *Industrial Power Distribution*, John Wiley & Sons, Inc., 2016, pp. 335-355.
- [23] Eesti standardikeskus, „Industrial a.c. networks affected by harmonics - Application of filters and shunt capacitors“. Standard EVS-EN 61642, 2002.
- [24] „Medium Voltage Detuned Reactor,“ LTREACTOR, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ltreactor.com/medium-voltage-filtering-reactor.html>. [Kasutatud 2. Mai 2019].
- [25] Elering, „Elering AS võrgulepingu tüüptingimused,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.elering.ee/sites/default/files/attachments/Elering\\_AS\\_vorgulepingu\\_tuuptingimused\\_alates\\_10.08.2014.pdf](https://www.elering.ee/sites/default/files/attachments/Elering_AS_vorgulepingu_tuuptingimused_alates_10.08.2014.pdf). [Kasutatud 13. Mai 2019].
- [26] Elering, „Võrguteenus,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://elering.ee/vorguteenus>. [Kasutatud 1. Mai 2019].
- [27] E. Sapp, „Ülekandeteenuse võrgutasu järgmise perioodi struktuuri meetoodika ettepanek,“ Juuni 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://elering.ee/loppenud-konsultatsioonid#tab5>. [Kasutatud 1. Mai 2019].
- [28] J. Houdek ja C. Chavez, „Extending the life of power factor capacitors,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: [www.apqpower.com/assets/files/ExtendingtheLifeofPFCapacitors.pdf](http://www.apqpower.com/assets/files/ExtendingtheLifeofPFCapacitors.pdf). [Kasutatud 14. Mai 2019].
- [29] Circutor, „Solutions for Power Factor Correction at Medium Voltage,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: [http://circutor.com/docs/MitjaTensio\\_EN\\_Cat.pdf](http://circutor.com/docs/MitjaTensio_EN_Cat.pdf). [Kasutatud 29. Aprill 2019].
- [30] ZEZ-Silko, „Medium voltage power capacitors,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.zez-silko.com/en/products/medium-voltage-power-capacitors>. [Kasutatud 25. Aprill 2019].
- [31] ABB, „Power Capacitors and Harmonic Filters Buyer’s Guide,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://library.e.abb.com/public/7385b4a156d09453c1257bf600227be7/1HSM%209543%2032-00en%20Capacitors%20Buyers%20Guide%20Ed%201.pdf>. [Kasutatud 25. Aprill 2019].

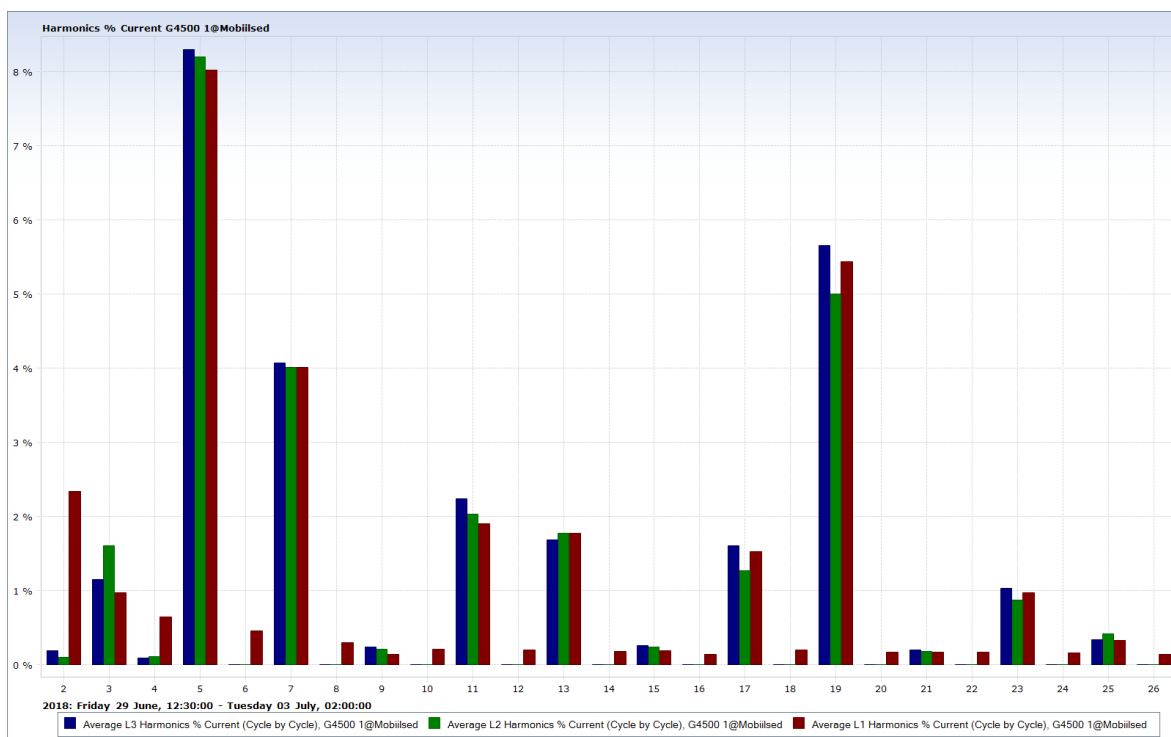
# LISAD

## Lisa 1 Harmoonikute mõõtetulemused [14]

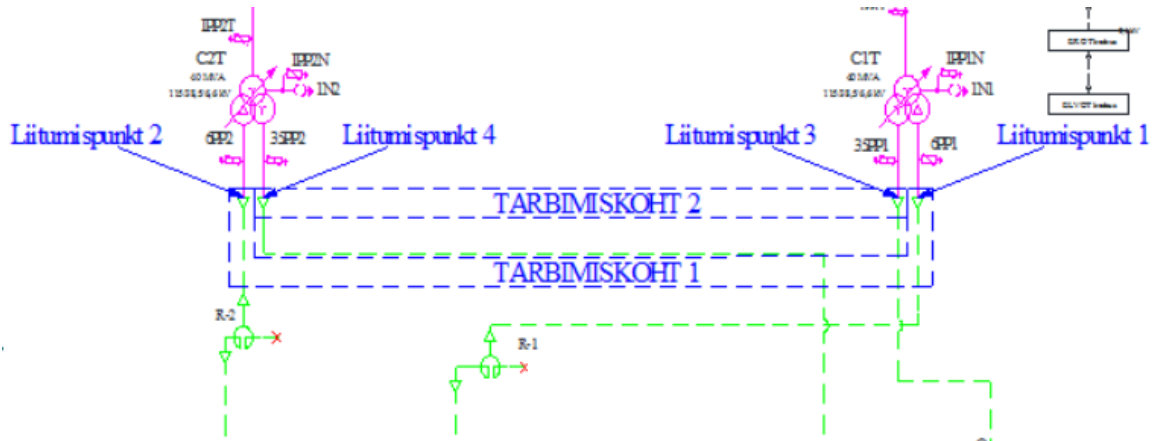
LISA 1.1 Kõrgemaid harmoonikuid sisaldav voolu kaineukuju, mõõdetud Elspeci The BlackBox G4500 analüsaatoriga Jaoskonna AJ-s [14]



## LISA 1.2 N-inda harmoonikute sisaldus protsentidena põhiharmoonikus [14]



Lisa 2 Tarbimiskoha näide [27]



### Lisa 3 Alajaama 1 mõõtmised programmist Vtrin [14]

